



**Politécnico
de Viseu**

Escola Superior
de Tecnologia
e Gestão de Viseu

SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DAS FACHADAS DE UM QUARTEIRÃO DO CENTRO HISTÓRICO DE VISEU

Alícia Vieira Sousa

Dissertação

Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida
Professor Doutor Eduardo Leite Krüger

Novembro de 2023



**Politécnico
de Viseu**

Escola Superior
de Tecnologia
e Gestão de Viseu

SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DAS FACHADAS DE UM QUARTEIRÃO DO CENTRO HISTÓRICO DE VISEU

Alícia Vieira Sousa

Dissertação

Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação

Trabalho efetuado sob a orientação de

Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida
Professor Doutor Eduardo Leite Krüger

Novembro de 2023

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão a todas as pessoas que contribuíram de alguma forma na concretização da presente dissertação de mestrado. Esse é um momento especial, e não teria sido realizado sem o apoio incondicional daqueles que estiveram ao meu lado ao longo desta jornada.

Primeiramente, quero agradecer aos meus pais, Luciana e Paulo, cujo amor e dedicação foram uma base sólida sobre a qualidade de cada passo desse percurso acadêmico. Sua paciência, encorajamento e apoio foram fundamentais.

Aos meus amigos do Brasil, que, apesar da distância, as palavras amigas e apoio constante foram cruciais para superar os obstáculos encontrados ao longo do caminho. Aos amigos que fiz durante o programa de Dupla Diplomação em Portugal e compartilharam comigo rotina de estudos e experiências incríveis.

Ao meu orientador, Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida, por todo apoio prestado, pela disponibilidade, motivação, tempo, confiança e pela partilha de conhecimentos e sugestões ao longo de todo o desenvolvimento do trabalho. Ao meu coorientador, Professor Doutor Eduardo Leite Krüger, por todo apoio durante minha jornada acadêmica, pela disponibilidade, confiança e partilha de conhecimentos.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná por todo aprendizado, dentro e fora da sala de aula e pelo programa de Dupla Diplomação, que me proporcionou essa oportunidade. Ao Instituto Politécnico de Viseu por me receber e permitir viver essa experiência que vai muito além de conhecimentos acadêmicos.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, desenvolveram para o desenvolvimento deste trabalho. Cada conselho, discussão e feedback foram preciosos, moldando o resultado desta dissertação.

A todos, meu muito obrigada!

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo simular o comportamento térmico das fachadas de algumas construções do centro histórico da cidade de Viseu, para avaliar o risco de condensação superficial, utilizando para tal o programa *CitySim*. Buscando compreender e demonstrar o potencial e versatilidade do *software*, além de analisar os resultados obtidos com as simulações.

Inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica contemplando normas que impactam nas questões térmicas e energéticas das edificações existentes em Portugal e *softwares* presentes no mercado que apresentavam certa similaridade com o escolhido. A partir disso, realizou-se a modelação tridimensional do quarteirão selecionado e sua calibração com as informações construtivas dos edifícios e questões climáticas da cidade.

Após a demonstração geral de resultados, foi escolhido analisar temperaturas das paredes externas de um grupo selecionado de fachadas, representando várias situações diante do aglomerado de edifícios. O processo de simulação gerou uma grande amostra de dados permitindo realizar algumas inferências e relações. Destas destacaram-se os períodos com risco de condensação das fachadas. Com os dados levantados, foram efetuadas comparações com duas outras situações hipotéticas: a introdução de um isolante térmico face interior das fachadas dos edifícios e a simulação do aumento das temperaturas exteriores num possível cenário futuro.

O resultado da simulação atual demonstrou que as fachadas sofrem com o risco de condensação superficial externa durante uma percentagem significativa do ano. Em contrapartida, os dados da simulação com a adição do isolante térmico resultou no aumento dessa percentagem, pôr fim a terceira simulação ressaltou a influencia do aumento das temperaturas nesse fenômeno, pois o percentual de horas com risco de condensação caiu drasticamente.

Adicionalmente, o trabalho permitiu compreender a grande versatilidade do programa e verificou-se que o programa pode ser utilizado em múltiplos contextos: estudos de diferentes escalas, e edifícios já existentes, ou em construção, ou planeamento, mostrando uma grande versatilidade.

Palavras-chave: Risco de condensação; Centro histórico; Modelação tridimensional; Comportamento térmico; *CitySim*.

ABSTRACT

This work aimed to simulate the thermal behavior of the facades of some buildings in the historic center of the city of Viseu, to assess the risk of surface condensation, using the *CitySim* program for this purpose. Seeking to understand and demonstrate the potential and versatility of the software, in addition to analyzing the results obtained with the simulations.

Initially, a bibliographical review was carried out covering standards that impact the thermal and energy issues of existing buildings in Portugal and software present on the market that presented a certain similarity with the chosen one. From this, three-dimensional modeling of the selected block was carried out and its calibration with the constructive information of the buildings and climate issues in the city.

After the general demonstration of results, it was chosen to analyze the temperatures of the external walls of a selected group of facades, representing various situations within the cluster of buildings. The simulation process generated a large sample of data allowing some inferences and relationships to be made. Of these, periods with a risk of condensation on the facades stood out. With the data collected, comparisons were made with two other hypothetical situations: the introduction of a thermal insulator on the interior of the building facades and the simulation of the increase in external temperatures in a possible future scenario.

The result of the current simulation demonstrated that facades suffer from the risk of external surface condensation during a significant percentage of the year. In contrast, the simulation data with the addition of thermal insulator resulted in an increase in this percentage. Finally, the third simulation highlighted the influence of increased temperatures on this phenomenon, as the percentage of hours with risk of condensation fell drastically.

Additionally, the work allowed us to understand the great versatility of the program and it was found that the program can be used in multiple contexts: studies of different scales, and existing buildings, those under construction, or planning, showing great versatility.

Keywords: Risk of condensation; Historic center; Three-dimensional modeling; Thermal behavior; *CitySim*.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
ÍNDICE GERAL	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABELAS	xiii
ÍNDICE DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivo do trabalho	2
1.3 Abordagem metodológica.....	2
1.4 Estruturação do trabalho	3
1.5 Justificativa da pesquisa	3
2. REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1 Desenvolvimento sustentável e desempenho energético.....	5
2.1.1 Edificado e o desenvolvimento sustentável.....	7
2.1.2 Normativas para edificações.....	8
2.2 Identificação e comparação de programas de simulação térmica e energética	13
2.2.1 Building energy simulation	15
2.2.1.1 EnergyPlus.....	15
2.2.1.2 ANSYS	17
2.2.1.3 TRNSYS.....	17
2.2.1.4 TRACE 700	18
2.2.1.5 Bsim.....	18
2.2.2 City energy simulation	19
2.2.2.1 SynCity	21
2.2.2.2 LakeSIM.....	21

2.2.2.3	<i>CitySim</i>	22
2.3	Exemplos de utilização do <i>CitySim</i>	24
3.	METODOLOGIA	26
3.1	Local de estudo	26
3.2	Configuração da simulação	30
3.2.1	Modelação	30
3.2.2	Arquivo clima	34
3.2.3	Caracterização construtiva	40
3.3	Simulação	43
4.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	48
4.1	Avaliação da situação atual	48
4.2	Impacto da introdução de isolante térmico	59
4.3	Impacto de um cenário climático futuro	64
5.	Conclusões	71
5.1	Conclusões gerais	71
5.2	Sugestões de trabalhos futuros	72
	Referências	74
	Anexo A	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – 17 Objetivos de desenvolvimento sustentável.	6
Figura 2 – Dados do consumo das edificações.	8
Figura 3 – Linha temporal das normativas europeias e portuguesas.	11
Figura 4 – Época de construção dos edifícios existentes em Portugal.	12
Figura 5 – <i>Hype cycle</i> da simulação computacional termo energética.	14
Figura 6 – Localização de Viseu no mapa de Portugal.	26
Figura 7 – Mapa da sub-região de Viseu Dão-Lafões.	27
Figura 8 – Clima de Viseu.	28
Figura 9 – Vista área do local de estudo.	29
Figura 10 – Prédios do local de estudo.	30
Figura 11 – Contorno dos prédios do estudo.	31
Figura 12 – Desenho base dos prédios do estudo.	31
Figura 13 – Planta dos edifícios.	32
Figura 14 – Edifícios com altura real.	33
Figura 15 – Desenho do centro histórico de Viseu.	33
Figura 16 – Modelo tridimensional do centro histórico de Viseu.	34
Figura 17 – Interface <i>Meteonorm 5.1</i>	34
Figura 18 – Configuração do sistema de unidades.	35
Figura 19 – Seleção das variáveis de output.	36
Figura 20 – Escolha da estação meteorológica.	37
Figura 21 – Escolha da estação meteorológica.	37
Figura 22 – Escolha da estação meteorológica.	38
Figura 23 – Amostra do início do arquivo <i>.dat</i> obtido por meio do <i>Meteonorm version 5.1</i>	38
Figura 24 – Início do arquivo do clima <i>.cli</i>	39
Figura 25 – Início do arquivo de material.	40
Figura 26 – Início da parte de composição das paredes.	41
Figura 27 – Esquema de um elemento construtivo de parede de granito.	42
Figura 28 – Esquema do elemento construtivo telhado.	42
Figura 29 – Esquema do elemento construtivo piso.	43
Figura 30 – Importação do desenho para o <i>CitySim</i>	43
Figura 31 – Importação do desenho para o <i>CitySim</i>	44
Figura 32 – Elemento construtivo do vidro.	44
Figura 33 – Exemplo de resultados do <i>CitySim</i>	45
Figura 34 – Resultados gerados em formato de texto.	46
Figura 35 – Amostra dos dados <i>_TS</i> no ficheiro do <i>Excel</i>	49
Figura 36 – Paredes selecionadas.	49
Figura 37 – Amostra dos dados das fachadas e dos dados climáticos no ficheiro do <i>Excel</i>	50

Figura 38 – Amostra dos dados prontos no ficheiro do <i>Excel</i>	51
Figura 39 – Horas do ano <i>versus</i> horas de condensação da fachada 202.....	53
Figura 40 – Horas do ano <i>versus</i> horas de condensação da fachada 226.....	53
Figura 41 – Horas do ano <i>versus</i> horas de condensação da fachada 260.....	53
Figura 42 – Horas do ano <i>versus</i> horas de condensação da fachada 308.....	54
Figura 43 – Horas do ano <i>versus</i> horas de condensação da fachada 438.....	54
Figura 44 – Horas do ano <i>versus</i> horas de condensação da fachada 500.....	55
Figura 45 – Meses do ano <i>versus</i> horas de condensação das fachadas.	56
Figura 46 – Frequência de horas consecutivas com risco de ocorrência de condensação da fachada 226.	57
Figura 47 – Frequência de horas consecutivas com risco de ocorrência de condensação da fachada 260.	58
Figura 48 – Frequência de horas consecutivas com risco de ocorrência de condensação da 438.	58
Figura 49 – Ocorrência de risco de condensação nas fachadas 260 e 438.....	59
Figura 50 – Componente construtivo da parede com EPS.....	60
Figura 51 – Comparação das temperaturas superficiais com e sem EPS das fachadas 202 e 226.	61
Figura 52 – Frequência da variação da temperatura fachada 226.....	62
Figura 53 – Frequência da variação da temperatura fachada 260.....	62
Figura 54 – Frequência da variação da temperatura fachada 500.....	63
Figura 55 – Diferença de temperatura da fachada 500.	64
Figura 56 – Início do novo arquivo clima .cli com a alteração da temperatura do ar.....	65
Figura 57 – Comparação das temperaturas situação atual e futura da fachada 202.....	66
Figura 58 – Variação da diferença de temperatura entre a situação atual e futura, para as horas do ano da fachada 202.....	67
Figura 59 – Variação da diferença de temperatura entre a situação atual e futura, para as horas do ano da fachada 226.....	68
Figura 60 – Variação da diferença de temperatura entre a situação atual e futura, para as horas do ano da fachada 260.....	68
Figura 61 – Variação da diferença de temperatura entre a situação atual e futura, para as horas do ano da fachada 308.....	68
Figura 62 – Variação da diferença de temperatura entre a situação atual e futura, para as horas do ano da fachada 438.....	69
Figura 63 – Variação da diferença de temperatura entre a situação atual e futura, para as horas do ano da fachada 500.....	69
Figura 64 – Comparação das temperaturas do cenário atua e futuro da fachada 202 durante o período de 3515 e 6527 horas.	70

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – <i>Software</i> de simulação de edifícios no contexto urbano..	20
Tabela 2 – Informações do cabeçalho do arquivo climático.	39
Tabela 3 – Dados meteorológicos.	39
Tabela 4 – Valores adotados para o vidro.	45
Tabela 5 – Descrição dos resultados em formato de texto.	47
Tabela 6 – Avaliação do risco de condensação na situação atual.	51
Tabela 7 – Gravidade das condensações..	52
Tabela 8 – Resultados obtidos com o EPS.	60
Tabela 9 – Diferenças médias na temperatura superficial com e sem o EPS	61
Tabela 10 – R Resultados obtidos com o novo ficheiro climático.	66
Tabela 11 – Comparação do cenário atual e de um futuro.	67

ÍNDICE DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ANL	<i>Argonne National Laboratory</i>
ASCUII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
BCSD	<i>Business Council for Sustainable Development</i>
BLAST	<i>Basic Local Alignment Search Tool</i>
BSim	<i>Building Simulation</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CE	Comissão Europeia
CLI	<i>Command-Line Interface</i>
CoBAM	<i>Commercial Building Agent Model</i>
DOE	<i>Department of Energy</i>
DEC	Departamento Engenharia Civil
DXF	<i>Drawing Exchange Format</i>
EPBD	<i>Energy Performance of Buildings Directive</i>
EPFL	<i>École Polytechnique Fédérale de Lausanne</i>
ESP-r	<i>Energy Systems Performance – Research</i>
ETH Zurich	<i>Eidgenössische Technische Hochschule Zürich</i>
EU	<i>European Union</i>
GAMS	<i>The General Algebraic Modeling Language</i>
GEBA	<i>Gloal Energy Balance Archive</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
HVAC	<i>Heating, Ventilating and Air Conditioning</i>
IBPSA	<i>International Building Performance Simulation Association</i>
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LabEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
LakeSIM	<i>Lakeside Sustainable Infrastructure Model</i>
LBNL	<i>Lawrence Berkeley National Laboratory</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
NZEB	<i>Near Zero Energy Building</i>
OCTA	Corresponde a um céu do qual 1/8 da superfície é ocupada por nuvens
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
ORNL	<i>Oak Ridge National Laboratory</i>
PIB	Produto Interno Bruto
Pnuma	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PO	Ponto de orvalho

PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
RH	Umidade relativa
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade para Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviço e Públicos
RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios
SCE	Sistema de Certificação Energética dos Edifícios
SynCity	<i>Synthetic City</i>
Ta	Temperatura do ar
TSV	Valores Separados por Tabulação
UE	União Europeia
UMI	<i>The Urban Modeling Interface</i>
UNEP	<i>UN Environment Programme</i>
W	Watt
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>
XML	<i>Extensible Markup Language</i>
°C	Grau Celsius
°	Grau

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A sustentabilidade e a eficiência energética são temas que estão cada vez mais na ordem do dia no setor da construção civil. A necessidade de se avançar para edifícios de baixo consumo energético, ou mesmo autossuficientes, é uma prioridade assumida pela União Europeia e que se encontra vertida em vários documentos oficiais. Como exemplo pode-se citar a Diretiva Europeia para a Eficiência Energética dos Edifícios de 2002 e suas respetivas revisões. Porém, não é só de novas construções que os aglomerados urbanos são constituídos; deste modo, o foco deve estar também na melhoria das condições das edificações já existentes.

Neste contexto, melhorando o comportamento térmico dos edifícios, garante-se um melhor desempenho energético. Sendo assim, é necessário que se dinamize a reabilitação energética das edificações já existentes. No entanto, a reabilitação térmica e energética destes edifícios levanta vários desafios, uma vez que, em muitos casos, é crucial compatibilizar a intervenção com a necessária preservação dos valores arquitetónicos e construtivos dos edifícios. Uma das possíveis soluções, passa por uma visão mais integrada, incluindo o conjunto dos edifícios, em vez da tradicional visão individual de cada edifício.

Esta dissertação pretende contribuir para o avanço do conhecimento nesta área, por meio da análise de um caso de estudo baseado num modelo tridimensional de um quarteirão do centro

histórico de Viseu e posterior simulação do seu comportamento térmico utilizando o programa *CitySim*.

1.2 Objetivo do trabalho

Este trabalho tem como objetivo principal simular o comportamento térmico das fachadas de algumas construções do centro histórico de Viseu, para avaliar o risco de condensação superficial, utilizando para tal o programa *CitySim*.

Assim, os objetivos específicos que deverão ser cumpridos são:

- Aprendizagem e uso do programa *CitySim*;
- Preparação de um modelo tridimensional do quarteirão do centro histórico da cidade de Viseu selecionado como caso de estudo;
- Definição de um plano de simulação e análise dos respectivos resultados;
- Testar o potencial do *CitySim*, através dos resultados das temperaturas superficiais externas das fachadas e análise do risco de condensação superficial.

1.3 Abordagem metodológica

A simulação de comportamento térmico e energético de edifícios é uma área de pesquisa fundamental no contexto da compatibilização da eficiência energética com a preservação do patrimônio edificado. O centro histórico de Viseu possui uma rica herança cultural e arquitetônica, tornando esta temática ainda mais relevante, pois visa conciliar a conservação do patrimônio com a busca pela sustentabilidade.

A abordagem metodológica proposta para atingir os objetivos deste trabalho segue um conjunto de passos que envolve a coleta de dados, modelagem e simulação. Ou seja, trata-se de uma pesquisa quantitativa, uma vez que as variáveis são mensuráveis, que tem como base um estudo de caso. No levantamento de dados, será realizado o detalhamento do quarteirão em questão, incluindo informações arquitetônicas, históricas e construtivas dos edifícios. Além disso, serão coletados dados meteorológicos locais para alimentar os modelos de simulação. Utilizando um *software* de simulação especializado, *CitySim*, será desenvolvido um modelo computacional tridimensional dos edifícios do quarteirão. Esse modelo será testado com base

nos dados coletados, levando em consideração as características arquitetônicas e os materiais de construção históricos.

Esta abordagem metodológica permitirá uma análise abrangente do comportamento térmico e do desempenho energético do quarteirão do centro histórico de Viseu, fornecendo percepções importantes para a preservação do patrimônio cultural e o avanço na busca por soluções sustentáveis. A pesquisa terá como base a integração de conhecimentos da área de engenharia civil, arquitetura, sustentabilidade e conservação do patrimônio cultural.

1.4 Estruturação do trabalho

Este trabalho está organizado em seis capítulos distintos:

- No capítulo 1 foi feita a apresentação do trabalho desenvolvido, mostrando o enquadramento geral do tema e os principais objetivos a serem alcançados;
- No capítulo 2 foi realizada uma revisão da literatura, apresentando os *softwares* utilizados para modelação e simulação e uma explicação geral sobre simulações térmicas e energéticas;
- No capítulo 3 é apresentado o local de estudo, assim, como foi montada e realizada a simulação;
- No capítulo 4 apresentam-se discussões com base nos resultados obtidos e no resultado do *software* utilizado;
- No capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões realizadas a partir do presente trabalho, bem como algumas considerações para eventuais trabalhos futuros.

1.5 Justificativa da pesquisa

Com base na situação atual, a importância das questões relacionadas à eficiência energética em construções e suas regulamentações têm aumentado consideravelmente no setor da construção civil. A promoção e a disseminação dos princípios de eficiência energética em edificações têm sido alvo de significativos investimentos e debates tanto por parte de entidades privadas quanto de pesquisadores.

Nesse contexto, os programas de simulação se destacam como ferramentas capazes de contribuir para aprimorar a qualidade de edifícios ao longo de seu ciclo de vida. Eles desempenham um papel fundamental na criação de edifícios mais sustentáveis. O *software CitySim* é um exemplo recente, que tem como objetivo oferecer suporte para a tomada de decisões relacionadas ao planejamento à escala urbana. Estas abordagens são fundamentais para envolver todas as partes interessadas na minimização do consumo de energia não renovável e na redução das emissões de gases do efeito estufa. Além disso, a modelagem paramétrica apresenta diversas alternativas de projeto que podem ser simuladas e avaliadas, mesmo durante a fase de construção.

O uso de ferramentas computacionais para simulações oferece uma significativa vantagem em relação aos experimentos realizados no local, devido à capacidade de manipular uma ampla gama de parâmetros sem a necessidade de interferir na edificação. Isso permite a análise de diversas combinações e variações, isoladamente e em conjunto, bem como suas respectivas influências. Essa abordagem pode ser aplicada tanto a edifícios já existentes quanto àqueles em fase de construção, como projetos em desenvolvimento. Em conclusão, estas ferramentas possibilitam a avaliação de diferentes soluções como o objetivo de melhorar o desempenho da edificação, permitindo uma análise minuciosa e flexível das intervenções necessárias (Sorgato, 2009).

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Desenvolvimento sustentável e desempenho energético

As políticas públicas relacionadas ao meio ambiente começaram a ser discutidas na Conferência de Estocolmo, em 1972. No entanto, o conceito de sustentabilidade só foi introduzido no ano de 1980, por Lester Brown, fundador do *Worldwatch Institute*, que definiu sociedade sustentável como aquela que é capaz de satisfazer as suas necessidades sem comprometer os pressupostos de sobrevivência das gerações futuras. Já em 1987, o relatório da Comissão Mundial do Meio Ambiente e Desenvolvimento, conhecido como “Relatório *Brundtland*”, aproveitou a mesma definição para apresentar a noção de Desenvolvimento Sustentável, baseado no respeito e na solidariedade intergeracionais, no qual a sociedade possuirá a capacidade de atender às necessidades atuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras. Estas foram as primeiras definições sobre sustentabilidade, o conceito surgiu devido à necessidade de soluções para problemas provocados pela exploração descontrolada dos recursos naturais ao longo da história da humanidade (Almeida & Abranja, 2009).

Em 1992, ocorreu a Conferência das Nações Unidas no Rio de Janeiro, conhecida como Rio 92, nela configurou-se o desenvolvimento sustentável e procurou conciliar o desenvolvimento socioeconômico com a conservação e proteção dos ecossistemas. Esta Conferência contribuiu para a consciencialização da responsabilidade dos danos impostos ao meio ambiente, que ocorriam maioritariamente nos países desenvolvidos. Foi ainda reconhecida a necessidade de apoio financeiro e tecnológico aos países em desenvolvimento,

para que esses pudessem avançar em busca do desenvolvimento sustentável. Entretanto, apenas na Conferência de Joanesburgo em 2002 se conseguiu configurar geopoliticamente a sustentabilidade.

Em 2016 entrou em vigor a resolução da Organização das Nações Unidas (ONU) intitulada: “Transformar o nosso mundo: Agenda 2030 de Desenvolvimento Sustentável”, constituída por 17 objetivos (Figura 1), desdobrados em 169 metas. Os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) foram aprovados em setembro de 2015, por unanimidade, pelos 193 Estados-membros da ONU, em uma Assembleia-Geral na sede da ONU, em Nova Iorque (EUA). Os ODS visam resolver as necessidades das pessoas, tanto nos países desenvolvidos, como nos países em desenvolvimento, enfatizando que ninguém deve ser abandonado (Global Compact Network Portugal, 2023).



Figura 1 – 17 Objetivos de desenvolvimento sustentável.
Fonte: BCS Portugal, 2023.

O desenvolvimento sustentável está associado à necessidade de conduzir os recursos naturais e a qualidade ambiental com uma visão de futuro, porém o conceito é mais amplo, pois além da questão ambiental envolve as dimensões econômica e social (Almeida & Abranja, 2009). Somente quando esses três fatores são considerados em conjunto é possível o desenvolvimento sustentável. Em complemento, Sage (1998) afirmou que o desenvolvimento sustentável deveria ter como pressupostos o progresso sociocultural e a preservação ambiental (por meio de uma utilização controlada dos recursos naturais) aliados a uma evolução econômica e tecnológica, baseadas na eficiência e competitividade produtiva.

Com base nos conceitos apresentados, um sistema sustentável é baseado na capacidade de prover serviços essenciais sem exaurir os recursos naturais, o uso eficiente dos recursos engloba tanto a dimensão ambiental quanto a econômica. O uso ineficiente de energia proporciona prejuízos em qualquer economia, implicando em impactos ambientais em nível local, regional e global. Um sistema de energia sustentável implica no uso eficiente dos recursos, o aumento de recursos renováveis e o uso controlado de não renováveis em tecnologias avançadas. A energia eficiente é a máxima prioridade na mudança para um padrão de energia sustentável. Sendo assim, a eficiência energética é a capacidade de utilizar menos energia para produzir a mesma quantidade de iluminação, aquecimento, transporte e outros serviços baseados na energia (US Report Of The National Policy Development Group, 2001).

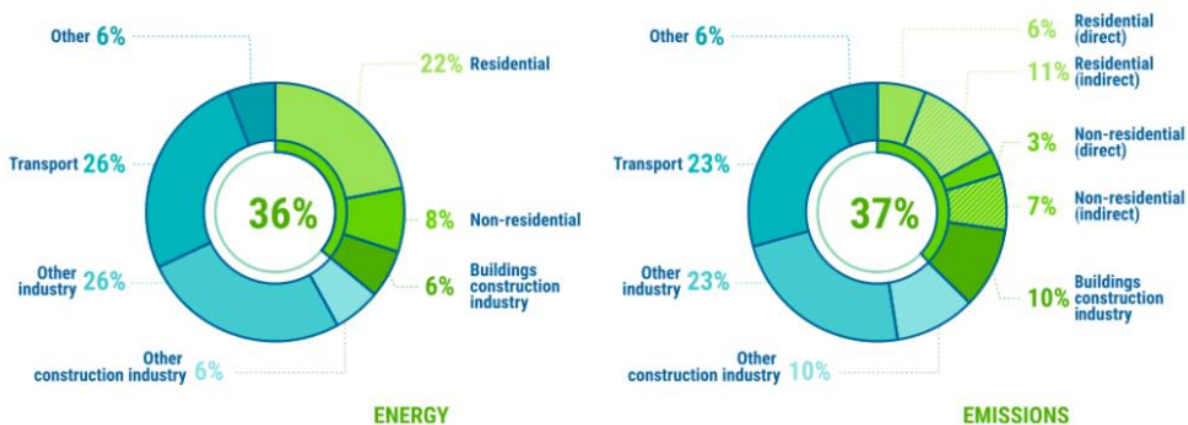
Kuennen (1998) defende que a eficiência energética não pode ser encarada de forma simplista, mas sim como um meio de atingir objetivos mais amplos, como o desenvolvimento sustentável e a equidade social. Geller *apud* Menkes (2004) afirma que, o aumento da eficiência energética é crítico para a redução das emissões de dióxido de carbono, uma vez que não existem tecnologias para o controle dessas emissões provenientes das usinas térmicas, veículos e outras fontes. Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (1997, p. 5), com base no conceito sintético e primordial sobre o que seria eficiência, “um edifício é mais eficiente energeticamente quando proporciona as mesmas condições ambientais com menor consumo de energia que outro nas mesmas condições”.

2.1.1 Edificado e o desenvolvimento sustentável

As edificações consomem em média 30% do total de energia em uso na sociedade (UNEP, 2009). Em Portugal, 25% do total nacional da energia é consumida pelo setor dos edifícios, mas este número aproxima-se dos 40% nas grandes cidades, onde se concentra também a grande maioria da população (Guedes, Pinheiro & Alves 2009).

Em relação ao consumo de recursos naturais, a construção civil chega a representar 30% do consumo (Leite & Hackenberg, 2020). O Relatório de Situação Global para Edifícios e Construção de 2021, (*Global Alliance for Building na Construction – GlobalABC*), publicado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Pnuma), em 2020, indica que as edificações são responsáveis por 37% das emissões de carbono na atmosfera, 36% do consumo de energia e 50 % do consumo de recursos naturais, (Figura 2), a perspectiva é que esse índice

aumento em 100% até 2060 (Pnuma, 2020). Já o consumo de energia elétrica por edificações residenciais deve chegar a 86% até 2050, enquanto edificações industriais e comerciais, pode subir 43% e 55%, respectivamente, considerando as demandas do avanço tecnológico e as mudanças trazidas pela pandemia da COVID-19 (U.S. energy information administration, 2021).



Note: "Buildings construction industry" is the portion (estimated) of overall industry devoted to manufacturing building construction materials such as steel, cement and glass. Indirect emissions are emissions from power generation for electricity and commercial heat.
 Source: IEA 2021a. All rights reserved. Adapted from "Tracking Clean Energy Progress"

Figura 2 – Dados do consumo das edificações.
 Fonte: Pnuma, 2020.

As cidades são historicamente concentrações de poder que controlam os fluxos econômicos, sociais, culturais e políticos, constituindo centros de acumulação de riquezas e conhecimento (Andrade & Romero, 2004). O rápido crescimento demográfico ao nível mundial e o crescimento do êxodo rural aumentam a necessidade de habitação, transporte e comunicação. Estes fatores conferem ao setor de construção a área fundamental para o desenvolvimento da sociedade.

2.1.2 Normativas para edificações

Atualmente, estima-se que mais da metade da população mundial esteja vivendo em assentamentos urbanos (ONU, 2004). Esse número é de aproximadamente 70% para a população europeia (Karppinen *et al.*, 1999). Sendo os assentamentos urbanos responsáveis pela maioria das emissões de gases de efeito estufa, uma vez que a energia derivada de combustíveis fósseis é fundamental para o funcionamento dos aglomerados urbanos. Em

dezembro de 2002, o Parlamento Europeu e o Conselho Europeu, publicaram a Diretiva 2002/91/CE, relativa ao desempenho energético dos edifícios, que impõe ao Estados-Membros a adoção de medidas de boa gestão energética que permitem obter um melhor rendimento e, assim, uma maior eficiência energética.

A União Europeia (UE) tem por objetivo tornar a sua economia mais sustentável, sendo assim a Comissão Europeia (órgão executivo da UE, politicamente independente) criou o Pacto Ecológico Europeu (*European Green Deal*) que é um pacote de medidas para alcançar este objetivo e beneficiar a transição sustentável. Os edifícios constituem um elemento crucial desta iniciativa, uma vez que representam 40% do consumo total de energia e 36% das emissões de gases com efeito de estufa da União Europeia, sendo estes os maiores consumidores individuais de energia da Europa (*European Commission, 2023a*).

Desta forma a melhoria da eficiência energética dos edifícios desempenha um papel fundamental para alcançar o ambicioso objetivo de neutralidade carbônica até 2050 estabelecido no Pacto Ecológico Europeu. Este melhoramento procura aumentar a taxa e a qualidade das obras de renovação dos edifícios existentes, de modo que estes emitam menos dióxido de carbono (*European Commission, 2023b*).

Somado ao Pacto Ecológico Europeu, a União Europeia estabeleceu um quadro legislativo que inclui a Diretiva 2010/31/EU de Desempenho Energético dos Edifícios (que é uma reformulação mais exigente da Diretiva 2002/91/CE) e a Diretiva 2012/27/EU de Eficiência Energética. Em conjunto, as Diretivas têm como objetivo alcançar um parque imobiliário altamente eficiente energeticamente e descarbonizado até 2050, criar um ambiente estável para decisões de investimento e permitir que consumidores e empresas façam escolhas com mais informação para economizar energia e dinheiro. As duas Diretivas sofreram alterações em 2018 e 2019, no âmbito do Pacote Energia Limpa para Todos os Europeus. O pacote foi adotado em 2019, com o objetivo de descarbonizar o sistema energético da União Europeia, de acordo com os objetivos do Pacto Ecológico Europeu, e é composto por oito novas leis (*European Commission, 2023c*).

O Pacote pretende ajudar a descarbonizar o sistema energético da União Europeia, além de introduzir novos elementos e modernizar o setor da edificação com o aumento das tecnologias. A Diretiva Desempenho Energético dos Edifícios (2018/844/UE) descreve medidas específicas para o setor da construção enfrentar os desafios, atualizando e alterando muitas regras anteriores (Diretiva 2010/31/UE). Já a Diretiva de Eficiência Energética

(2018/202/UE), define metas vinculativas de aumento da eficiência energética e relação aos níveis da época em pelo menos 32,5% até 2030, modificando assim a Diretiva anterior (2012/27/EU) (*European Commission, 2023c*).

A Diretiva alterada (2018/844/EU) abrange opções de políticas e medidas de apoio que ajudarão os governos europeus a aumentar o desempenho energético e melhorar o parque imobiliário existente. Esta Diretiva exige que sejam estabelecidas estratégias de renovação a longo prazo além de objetivos para os anos de 2030, 2040 e 2050. A alteração também exige que os países estabeleçam requisitos mínimos de desempenho energético para novos edifícios e edifícios existentes submetidos a grandes reformas. Desde 2019, todos os novos edifícios públicos deveriam ser edifícios de energia quase zero (NZEB) e em 2021 essa regra se estendeu a todos os demais edifícios (*European Commission, 2023b*).

Em outubro de 2020, a Comissão Europeia (2023) apresentou uma proposta denominada *Renovation Wave*, no âmbito do Pacto Ecológico Europeu. A proposta contém um plano de ação com medidas concretas de regulamentação, financiamento e habilitação para impulsionar a renovação de edifícios. Seu objetivo é pelo menos dobrar a taxa anual de renovação energética de edifícios até 2030 e promover aprimoramentos profundos nas construções. A revisão da Diretiva de Desempenho Energético dos Edifícios é uma das suas principais iniciativas (*European Commission, 2023a*).

Segundo a Comissão da União Europeia (2023) os investimentos em eficiência energética estimulam a economia, principalmente a indústria da construção, que gera cerca de 9% do PIB da Europa e responde diretamente por 18 milhões de empregos diretos. Já o levantamento efetuado em 2021 pelo mesmo órgão verificou que cerca de 35% dos edifícios do seu território mais de 50 anos, quase 75% do parque imobiliário é energeticamente ineficiente e apenas 1% do parque é renovado a cada ano (*European Commission, 2023b*).

Em contra partida o governo português lançou o primeiro regulamento térmico em 1990 por meio do Decreto-Lei n°40/90 – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) (Roriz & Ramos, 2008). Esse regulamento impôs requisitos mínimos para a envolvente na edificação, tendo como objetivo a satisfação das condições de conforto térmico nos edifícios reduzindo a necessidades de energia e ao mesmo tempo visava garantir a minimização de patologias resultantes dos fenômenos de condensações superficiais e internas nos elementos da envolvente do edifício (Pinto, 2015).

Em 2006, foram publicados o Decreto Lei n.º 78/2006 que define o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE), o Decreto-Lei n.º 79/2006 que cria o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em edifícios (RSECE) e o Decreto-Lei n.º 80/2006 que estabelece Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios. Estes decretos foram elaborados como adaptação da Diretiva Europeia 2002/91/CE (EPBD) para a realidade Portuguesa (Pinto, 2015).

Já em 2013, entrou em vigor o Decreto Lei n.º 118/2013, que aprova o sistema de certificação energética dos edifícios, o regulamento de desempenho energético dos edifícios de habitação e o regulamento energético dos edifícios de comércio e serviços. Esse Decreto Lei transpõe a Diretiva n.º 2010/31/EU, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 2010, relativa ao desempenho energético dos edifícios.

Na sequência em 2020, foi publicado o Decreto Lei n.º 101-D/2020 que estabelece os requisitos aplicáveis a edifícios para melhoria do seu desempenho energético e regula o sistema de certificação energética de edifícios, transpondo a Diretiva (UE) 2018/844 e parcialmente a Diretiva (UE) 2019/944. Na figura 3, é possível acompanhar esta linha temporal.

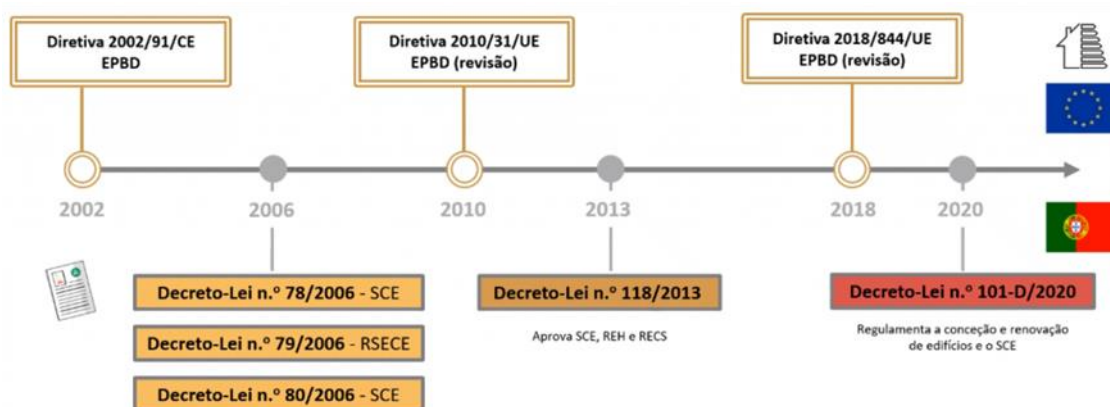


Figura 3 – Linha temporal das normativas europeias e portuguesas.
Fonte: SCE, 23023.

A figura 4, apresenta o ano de construção dos edifícios existentes em Portugal, os dados são do Censo 2021. É possível perceber que quase 63% do parque imobiliário português foi construído entre 1961 até 2000, o período com maior número de construções é o de 1961 a 1980, com 26,81%.

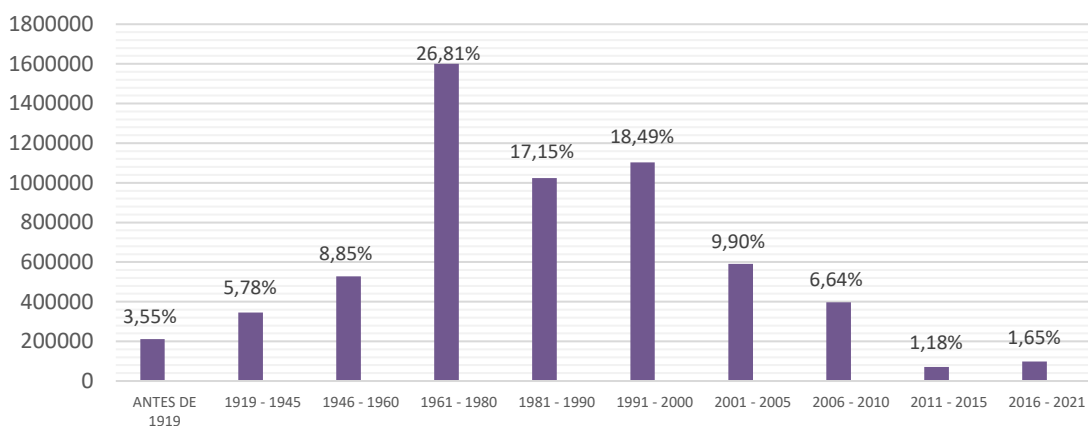


Figura 4 – Época de construção dos edifícios existentes em Portugal.

Portanto, com base no Censo 2021 verifica-se que 62,14% das edificações existentes em Portugal foram construídas antes do Decreto-Lei n°40/90, não possuindo condições mínimas de conforto e qualidade térmica na sua construção; já 28,39% das edificações foram construídas apenas com base neste decreto; e por fim, apenas 9,47% das edificações atuais respeitam os decretos a partir de 2006. Com estes dados é possível perceber que o edificado português foi elaborado e construído sem regulamentações, tornando precária as questões de eficiência energética.

No Brasil, até o início dos anos 2001, não existia lei ou norma de eficiência energética em edificações. A primeira legislação aprovada foi a Lei n° 10295/2001, que aborda a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, regulamentada pelo Decreto n°4059, que estabeleceu a criação níveis máximos de consumo de energia, ou mínimos de eficiência energética, de máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados ou comercializados no país, assim como as edificações construídas. Após o decreto foi criado um grupo técnico para eficientização da energia nas edificações no país, com o objetivo de criar uma forma de regulamentar as edificações construídas no Brasil visando o uso consciente da energia elétrica (Carlo & Lamberts, 2010).

O Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) é um programa que visa o uso racional de energia elétrica e foi instituído em dezembro de 1985 pelos Ministérios de Minas e Energia e da Indústria e Comércio do Brasil. As ações do Procel contribuem para o aumento da eficiência dos bens e serviços, para o desenvolvimento de hábitos e conhecimentos sobre o consumo eficiente da energia e, além disso, postergam os investimentos no setor elétrico, mitigando, assim, os impactos ambientais e colaborando para

um Brasil mais sustentável. Este programa acabou fortalecido pela implantação da Lei e Decreto citados anteriormente. O ramo que aborda especificamente as edificações, PROCEL Edifica, desenvolveu o Regulamento Técnico da Qualidade para Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviço e Públicos (RTQ-C) e para Edifícios Residenciais (RTQ-R). Atualmente, o Brasil possui dois métodos para a avaliação do desempenho térmico de edificações residenciais por simulação computacional. O primeiro está no Regulamento Técnico da Qualidade para Níveis de Eficiência Energética de Edificações Residenciais ou RTQ-R e o segundo método está na norma de desempenho para edificações, a NBR 1575-1 que trata, do desempenho térmico (Carlo & Lamberts, 2010).

Davis (2013) desenvolveu um estudo que demonstra que os custos envolvidos na operação e manutenção de um edifício, ao longo de sua vida útil, correspondem a cerca de três ou quatro vezes o custo inicial de sua construção, afirmando, ainda, que parte desse custo tem relação com o consumo energético do edifício. Desde modo é necessário identificar soluções que conduzam a reduções significativas do consumo de recursos e de energia, mantendo simultaneamente padrões de qualidade de vida para os habitantes urbanos (Nayak & Sharma, 2019). Para isso, a modelagem computacional dos fluxos de recursos pode ser uma ferramenta inestimável de apoio à decisão para planejadores e designers urbanos (Kämpf & Robinson, 2009).

2.2 Identificação e comparação de programas de simulação térmica e energética

São chamados de programas de simulação computacional de desempenho térmico e energético aqueles que integram diferentes modelos físicos de transferência de calor para processar a interação de diversos sistemas da edificação. A simulação computacional possibilita, entre outras coisas, a identificação do efeito de cada fator isoladamente, o que não é possível na maioria dos casos reais. A facilidade de manipulação, baixo custo, redução do tempo de simulação e a diversidade de programas contribuem para a maior utilização dos programas computacionais (LabEEE, 2023).

Segundo Fenn e Raskino (2008) a história da simulação computacional térmica e energética pode ser entendida através do seu “*hype cycle*” (representação gráfica dos estágios do ciclo de vida de uma tecnologia), que se divide em cinco fases (Figura 5).



Figura 5 – *Hype cycle* da simulação computacional termo energética.
 Fonte: Sousa & Silva apud Hensen & Lamberts, 2021.

De acordo com Clarke (2007), o uso de simulação termo energética em computadores digitais remete a meados dos anos de 1960, com grande parte do trabalho inicial voltado ao cálculo das cargas térmicas para aquecimento e resfriamento dos ambientes e na análise do consumo de energia das edificações. Já para o Instituto de Pesquisa Tecnológicas - IPT (2004), no final da década de 1970, surgiram *softwares* com características diferenciadas, em que as trocas térmicas do edifício passaram a receber tratamento adequado gerando resultados confiáveis. Segundo Silveira (2014) a intenção inicial dos *softwares* era facilitar o dimensionamento adequado dos sistemas de ar-condicionado.

No início, a simulação termo energética se mostrou um avanço tecnológico de grande potencial, despertando o interesse de pesquisadores e do setor privado, aumentando a expectativa em torno destas ferramentas. Em 1997, no rescaldo da crise do petróleo, foi criado o *Department of Energy* (DOE), um órgão governamental norte americano, que tinha como objetivo inicial reorganizar e desenvolver políticas e programas de eficiência energética, criando um plano nacional de energia (Kubo, 2017).

O interesse se manteve até ao início dos anos 80, mas à medida que as expectativas não foram atingidas, a decepção com a tecnologia se tornou crescente. Somente em 1986, no auge do fosso das desilusões, surgiu a *International Building Performance Simulation Association* (IBPSA), uma sociedade internacional sem fins lucrativos de pesquisadores, desenvolvedores e profissionais de simulação de desempenho de edifícios, dedicada a melhorar o ambiente construído, aumentando novamente o interesse de pesquisadores e do setor empresarial. Porém,

somente em 1990 ocorreu a popularização da simulação para os trabalhadores da área de projeto. E no início do milênio, a simulação computacional atingiu o seu auge, sendo que a isso se associa a estabilidade e consolidação da tecnologia (Sousa & Silva, 2021).

Atualmente, a modelagem energética de edifícios é amplamente utilizada para desenvolver projetos de eficiência energética das construções, demonstrar conformidade com códigos, obter créditos para classificações de desempenho, avaliar opções de modernização e otimizar operações (Hong, Langevin & Sun, 2018). Nos últimos anos é notável o desenvolvimento de novos e diferentes programas de simulação computacional de desempenho termo energético de edificações, aumentando as variáveis possíveis de serem analisadas, além disso a utilização desses *softwares* passou a ser possível em todas as fases do projeto, facilitando a visualização de soluções e eventuais problemas de forma clara e precoce (LabEE, 2023).

Entre o grande número de *softwares* disponíveis, os de simulação energética podem ser divididos em *building energy simulation*, que simulam apenas a dinâmica individual do edifício, e os *city energy simulation*, que simulam mais de um edifício e levam em consideração os efeitos entre as estruturas e o microclima urbano. Na sequência serão apontados alguns dos principais *softwares* de simulação.

2.2.1 Building energy simulation

Para este tipo de modelação computacional e simulação é considerado somente as dinâmicas individuais de cada edifício. Esses modelos podem ser programados de diferentes maneiras e, como resultado, cada *software* terá seu próprio modo de identificar e processar os dados que lhe são fornecidos. Já o usuário, tem a capacidade de inserir no programa computacional os dados de entrada (*inputs*) adequados à finalidade que deseja alcançar (Pressman, 2011).

2.2.1.1 EnergyPlus

O EnergyPlus é um dos *softwares* mais completos atualmente, distribuído pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América, foi criado a partir de dois programas sendo eles, o BLAST e DOE-2; é utilizado para a simulação de carga térmica e análise energética de edificações. Esta ferramenta é gratuita, de código aberto e multiplataforma, pode

ser executada nos sistemas operacionais Windows, Mac OS X e Linux. Com o programa é possível modelar o consumo de energia (para aquecimento, resfriamento, ventilação, iluminação e cargas de processos) e o uso de água em edifícios. Conforme o sítio oficial do *software*, alguns dos recursos e capacidades de destaque incluem:

- Solução baseada em balanço de calor de efeitos radiantes e convectivos que produzem temperaturas de superfície, conforto térmico e cálculos de condensação;
- Intervalos de tempo definidos pelo usuário a cada hora para interação entre zonas térmicas e o ambiente;
- Modelo combinado de transferência de calor e massa que considera o movimento do ar entre as zonas;
- Biblioteca avançada de modelos de janela incluindo persianas controláveis, vidros eletrocromáticos (vidros que bloqueiam os raios infravermelhos) e balanços de calor camada por camada que calculam a energia solar absorvida pelas vidraças;
- Cálculos de iluminância e ofuscamento para relatórios de conforto visual e controles de iluminação de direção;
- Sistemas de condicionamento de ar configuráveis, que permitem simulações de sistemas padrões ou novas;
- Resumo padrão e relatórios de saída detalhado, bem como relatórios reajustados pelo usuário com resolução de tempo selecionável de anual até sub-horário (quartos de horas), todos com multiplicadores de fonte de energia;
- Modelo de céu anisotrópico para cálculos mais complexos da radiação difusa sobre superfícies inclinadas;
- Possibilidade de importação de arquivos DWG e RVT.

Como ponto negativo existe o fato de ainda não possuir interface gráfica que facilite a sua utilização, sendo necessária a utilização de outros *softwares* para a importação e exportação de dados. Estes *softwares* são chamados de *plug-ins* que servem como interface gráfica que melhoram a utilização do *software* através da facilidade da entrada e saída de dados e do próprio *layout* do programa, algum deles são: Open Studio e Design-build (EnergyPlus, 2023)

2.2.1.2 ANSYS

O ANSYS é um *software* de elementos finitos e de dinâmica de fluidos computacionais que pode ser utilizado em uma ampla gama de problemas de engenharia. O *software* oferece uma série de recursos avançados que possibilitam a criação de modelos complexos e precisos, bem como a realização de análises planejadas. Os usuários podem simular condições do mundo real, como temperaturas, pressões e campos elétricos, para avaliar o comportamento de produtos e sistemas sob diversas condições operacionais. O ANSYS também oferece uma interface de usuário amigável e uma ampla gama de opções de pós-processamento, tornando a análise e interpretação dos resultados mais vulneráveis (ESSS, 2023).

2.2.1.3 TRNSYS

O TRNSYS (*Transient Systems Simulation Tool*) é um *software* de simulação de sistemas dinâmicos desenvolvido para a análise de sistemas de energia e climatização. Embora a grande maioria das simulações se concentre na avaliação do desempenho de sistemas de energia térmica e elétrica, ele também pode ser usado para modelar outros sistemas dinâmicos, como fluxo de tráfego ou processos biológicos. Uma das principais características do TRNSYS é sua capacidade de modelar sistemas complexos em que os componentes interagem de maneira dinâmica ao longo do tempo (TRNSYS, 2023).

TRNSYS é composto de duas partes. O primeiro é um mecanismo (chamado de kernel) que lê e processa o arquivo de entrada, resolve iterativamente o sistema, determina a convergência e traça variáveis do sistema. A segunda parte é uma biblioteca de componentes, cada um modelando o desempenho de uma parte do sistema. A biblioteca padrão inclui aproximadamente 150 componentes comumente encontrados em sistemas de energia de edifícios, bem como rotinas para lidar com dados meteorológicos, processamento de radiação solar, equipamentos básicos de HVAC (*heating, ventilating and air conditioning*), tecnologias solares térmicas e elétricas, armazenamento térmico, entre outros. Os modelos são construídos de forma que os usuários possam modificar componentes existentes ou escrever os seus próprios, ampliando as capacidades do ambiente. Essa flexibilidade na escolha e configuração de componentes torna o TRNSYS altamente adaptável a uma variedade de cenários de simulações (TRNSYS, 2023).

2.2.1.4 TRACE 700

O TRACE 700 é um programa usado para construir um edifício virtual, calcular suas cargas de ar-condicionado e simular sua operação por hora, ao longo de um ano, podendo também realizar uma análise de custo do ciclo de vida. O *software* simula uma estrutura virtual, mas não exibe uma imagem visual do edifício, quase todas as superfícies são atualmente inseridas usando duas dimensões. Uma imagem visual requer entrada adicional e, portanto, mais trabalho (IBPSA-USA: *Building Energy Software Tools*, 2018).

O TRACE 700 foi primeiro um programa de cálculo de carga e depois um programa de cálculo de energia. Quase tudo no programa é personalizável, como todos os equipamentos, materiais e cronogramas que são totalmente personalizáveis e podem ser criados, editados e mantidos no banco de dados da biblioteca. O *software* é capaz de modelar sistemas *air side* diferentes, além de muitas configurações de plantas *HVAC* e estratégias de controle, incluindo armazenamento térmico, cogeração e otimização de pressão do ventilador e controles de iluminação natural. Bibliotecas e modelos personalizáveis simplificam a entrada de dados e permitem maior precisão de modelagem. Os modelos fornecem uma maneira rápida e fácil de analisar os efeitos das mudanças nas cargas do edifício, como fluxos de ar, configurações do termostato, ocupação e construção. Uma extensa biblioteca de materiais de construção, equipamentos e perfis climáticos aumenta a velocidade e a precisão de suas análises. A desvantagem do TRACE 700 é ter a sua licença paga e ser baseado unicamente no Windows (IBPSA-USA: *Building Energy Software Tools*, 2018).

2.2.1.5 Bsim

O Bsim é uma ferramenta para análise de edifícios e instalações voltada para simulação e cálculo de consumo de energia, condição de luz natural, transporte de umidade, cálculo de ventilação natural e produção elétrica de sistemas de energia solar. Atualmente, o programa é o mais utilizado na Dinamarca e com um crescimento de utilização na Europa. O *SimView* é a interface gráfica do usuário dos aplicativos incluídos no pacote do programa e no editor do modelo gráfico. A interface é usada para criar e definir recursos e propriedades do edifício, pode ser usado para criar uma geometria espacial a partir de um desenho de plano do AutoCAD salvo no formato DXF. Isso permite que os desenhos desenvolvidos no AutoCAD sejam utilizados como base para o estabelecimento da geometria do modelo complexo BSim. O

modelo é mostrado simultaneamente como um desenho 3D, um plano de chão e duas seções. O usuário pode definir qualquer um dos parâmetros calculados para sair em base horário, em forma tabular ou gráfica. As variáveis também podem ser apresentadas em gráficos ou tabelas “somadas” dos balanços de energia de cada zona ou de todo o edifício analisado. Todos os resultados podem ser facilmente exportados para o Excel ou similar para processamento posterior. A desvantagem desse programa é ter a sua licença paga e não possuir código aberto (Build., 2023).

2.2.2 City energy simulation

Para este tipo de modelação computacional e simulação é levado em conta o grupo de edifícios no contexto urbano, ou seja, é levado em conta os efeitos entre os edifícios e o microclima urbano. O objetivo é fornecer informações quantitativas para o utilizador. Dependendo do uso e do *software*, as simulações podem ter diferentes escalas espaciais e temporais, podendo abranger escalas espaciais desde um quarteirão com alguns edifícios até dezenas ou centenas de milhares de edifícios numa cidade inteira. Além disso, as escalas temporais podem variar, de uma hora, uma semana, um mês, um ano ou até décadas (Hong *et al.*, 2019).

A maior parte dos *softwares* não leva necessariamente em consideração os efeitos do microclima urbano. Normalmente, há um único arquivo meteorológico que representa as condições meteorológicas locais ou de toda a cidade. Apenas alguns modelos estão acoplados a simulações microclimáticas, mesmo que a maioria deles não represente a troca de radiação de ondas longas entre edifícios de maneira suficiente (Hong *et al.*, 2019).

Os usuários podem usar diferentes abordagens de modelagem. A determinação das escalas espaciais e temporais apropriadas, bem como as abordagens de modelagem, dependem dos casos de uso, ou seja, das questões a serem respondidas. Outros fatores importantes a serem considerados incluem disponibilidade e qualidade dos dados de entrada, experiência do usuário com as ferramentas escolhidas e recursos computacionais disponíveis (Hong *et al.*, 2019).

Este tipo de *softwares* é relativamente novo no mercado, sendo assim na Tabela 1 são apresentados *softwares* disponíveis e na sequência alguns são apresentados com maior detalhe.

Tabela 1 – *Softwares* de simulação de edifícios no contexto urbano.

Abordagem	Ferramenta	Desenvolvedor	
Método de simulação dinâmica baseado em física	CityBES	Plataforma de dados e computação baseada na Web para avaliar o desempenho energético de edifícios urbanos.	LBNL
	MIT UBEM Tool	Ferramenta para cálculo de carga de demanda de energia por hora em toda a cidade.	MIT
	UMI	Interface de modelagem urbana para análise de desempenho energético de Bairros.	MIT
	Virtual EPB	Criação automática de modelos de energia predial aproveitando simulação de aprendizado de máquina usando computação de alto desempenho.	ORNL
	Tool by Columbia University	Ferramenta para análises de desempenho energético em escala comunitária usando modelos energéticos de edifícios calibrados.	Columbia University
	Tool by Cambridge University	Ferramenta para análise de energia de edifícios para exibição e escala comunitária e exibição de mapa de emissões.	Cambridge University
	UrbanOPT	Ferramenta de modelação para integrar cargas energéticas e energias renováveis a nível distrital para desenvolver.	NREL
	COFFEE	Ferramenta para otimização de clientes de serviços públicos para promoção de eficiência energética.	NREL
	<i>CitySim</i>	Ferramenta de apoio à decisão para planejadores de energia urbana e partes interessadas para minimizar o uso e as emissões de energia.	EPFL
	SEMANCO	Ferramentas semânticas para redução de carbono no planejamento urbano.	FUNITEC
Método de cálculo baseado na redução da ordem do modelo	SimStadt	Ferramenta de energia urbana para análise energética de distritos urbanos.	Hochschule für Technik Stuttgart
	Energy Atlas	Representação espaço-semântica da estrutura da cidade, incluindo informações relacionadas à energia.	Technische Universität München
	LakeSIM	Ferramenta de modelagem de infraestrutura para ajudar a analisar a eficiência energética do desenvolvimento de novos bairros da cidade.	ANL
	Tool by Georgia Institute of Technology	Uma ferramenta para construção de modelagem energética com GIS em escala urbana.	Georgia Institute of Technology
	OpenIDEAS	Estrutura de código aberto para avaliação energética distrital integrada.	KU Leuven
	TEASER	Ferramenta para múltiplas avaliações de desempenho energético de edifícios.	RWTH Aachen University
	City Energy Analyst	Estrutura computacional para análise e otimização de energia sistemas em bairros e distritos da cidade.	ETH Zurich
	UrbanFootprint	Ferramenta de planejamento para acesso ao uso da terra, políticas e recursos em vários setores.	Calthorpe Analytics

Método baseado em dados	Tool by New York University	Ferramenta baseada na Web para visualizar referências de energia e prever desempenho energético.	New York University
	CoBAM	Ferramenta para estimar a adoção de tecnologias energeticamente eficientes para o parque imobiliário.	ANL

Fonte: Adaptado de Hong *et al.*, 2019.

2.2.2.1 SynCity

O programa de modelagem “*Synthetic City*”, SynCity, foi desenvolvido no Imperial College of London e consiste em uma biblioteca de códigos Java, que abriga um banco de dados de tecnologias e combustíveis de energia e três submodelos conectados, cada um projetado para lidar com uma parte específica da análise geral do sistema de energia urbana. O SynCity utiliza uma abordagem de programação matemática desenvolvida em *software* GAMS e é projetado para planejar novas infraestruturas energéticas (Keirstead, Samsatli & Shan, 2009).

O SynCity se baseia em três submodelos: o modelo de *layout* (posição dos edifícios, locais de atividades), o modelo de atividade do agente (micro simulação que gera demandas diárias de indivíduos dentro de uma cidade) e o modelo de rede de recurso-tecnologia (modelo de otimização que minimiza o custo de fornecimento de todo o sistema de fornecimento de energia) (Keirstead, Samsatli & Shan, 2009).

2.2.2.2 LakeSIM

O *Lakeside Sustainable Infrastructure Model* (LakeSIM) desenvolvido no *Argonne National Laboratory* é um programa de computador capaz de modelar opções de alto desempenho em uma base física para o desempenho da construção (Bergersn *et al.*, 2015). A demanda de energia dos edifícios é calculada pelo *Energy Performance Standard Calculation Toolkit, EECalc*, que se baseia nas normas ISO 13790 para prever o desempenho energético mensal dos edifícios, o ambiente urbano pode ser visualizado em uma plataforma de modelação 3D. De acordo com os autores, a próxima atualização será a integração de um *software* de modelagem de transportes (PO-LARIS) ao LakeSIM, para melhorar modelar a dinâmica da ocupação do edifício e conectá-lo aos agentes de transporte. Além disso, os criadores desenvolveram e validaram recentemente o *Commercial Building Agent Model (CoBAM)* e esta nova versão utiliza a versão mensal do ISO 13790 para calcular o consumo de combustível e

os efeitos de interação para condicionamento de espaço, iluminação e cargas acessórias de *plug-in* para edifícios residenciais e comerciais (Bergersn *et al.*, 2016).

2.2.2.3 *CitySim*

O *CitySim Pro* é um *software* gratuito, porém é necessário efetuar um login que é obtido através do preenchimento de um formulário disponibilizado no site oficial. O *CitySim* usa um modelo relativamente simples para a demanda térmica de construção desenvolvido por Kämpf e Robinson (2007), com base em uma analogia com um circuito elétrico. O modelo é capaz de lidar com cenários monozona e multizona. O *software* inclui modelos horários para a construção de instalações térmicas, radiação urbana, comportamento dos ocupantes, aquecimento, instalações/equipamentos de ventilação e ar-condicionado (*HVAC*) e sistemas de conversão de energia (todos integrados como um único mecanismo de simulação).

Construído sobre o *CitySim Solver*, desenvolvido no Laboratório de Energia Solar e Física de Edificações da *École Polytechnique Fédérale de Lausanne* (EPFL), o *CitySim Pro* é uma Interface Gráfica de Usuário (GUI) que visa a simulação e otimização da sustentabilidade de assentamentos urbanos. Já o *CitySim Solver*, é um solver integrado de linha de comando para simular a demanda e o fornecimento de energia de edifícios para condicionamento de espaço, juntamente com a especificação das características dos edifícios de entrada (no formato de arquivo *CitySim XML*) e dos arquivos climáticos (Meteonorm CLI formato de arquivo) (Kameo, 2023).

O *CitySim* visa fornecer suporte para tomada de decisões de planejamento de energia urbana e partes interessadas para minimizar consumo de energias não renováveis, assim como as emissões de gases associados ao efeito estufa. O *software* é rápido comparado com outros aplicativos de simulação, confiável (testado com sucesso em relação ao monitoramento de energia) e precisa de poucos dados de entrada, que são disponibilizados nos estágios iniciais do projeto (Nayak & Sharma, 2019).

No desenvolvimento e teste deste *software*, segundo Nayak e Sharma (2019), vários objetivos foram alcançados, entre eles:

- Apoio aos usuários do *software* a descrever, de forma adequada, as formas geométricas 3D dos edifícios na escala de um distrito urbano (compreendendo várias centenas de

edifícios) e atribuir propriedades termo físicas a esses edifícios de maneira eficiente usando um formato de arquivo XML;

- Simulação da procura energética destes edifícios, respeitando a natureza aleatória da presença e comportamento dos ocupantes e tendo em conta um conjunto de sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (sistemas *HVAC*) habitualmente utilizados;
- Determinação das fontes de energia desses edifícios emitidas por fontes renováveis, incluindo a troca de radiação impulsionada pelo ambiente urbano, gerada por uma variedade de sistemas de conversão de energia comumente usados;
- Exportação dos arquivos de texto padrão (TSV- valores separados por tabulação) para permitir que os usuários do *software* apoiem a análise dos dados de desempenho energético.

Conforme Kämpf e Robinson (2009) a estrutura do *CitySim* é definida em três partes. A primeira sendo uma GUI a segunda um banco de dados padrão contendo especificações relacionadas a construções e outros parâmetros e, finalmente, um solucionador. A GUI permite que o usuário desenhe edifícios dentro de um local urbano e inclui funções para manipular a geometria, que permitem que os utilizadores esbocem e avaliem a massa e deposição dos edifícios e suas qualidades espaciais entre si.

O programa descreve as características construtivas, ocupacionais, de aparelhos e sistemas de uma variedade de tipos e categorias etárias de edifícios que são mantidas em um banco de dados editável. Depois de associar os edifícios à sua categoria de construção relevante, estas características podem ser aperfeiçoadas à escala de todo o edifício ou mesmo para superfícies individuais da envolvente do edifício. Por padronização (*default*), é atribuído a um edifício um centro de energia, que contém sistemas *HVAC*, bem como as fontes de energia (rede ou sistema de conversão de energia) que satisfazem as suas necessidades, bem como as de luzes e aparelhos. Os edifícios também podem ser associados a um centro distrital de energia para fornecer necessidades de aquecimento, resfriamento ou energia. O usuário precisa inserir informações de localização e clima (Kämpf & Robinson, 2009). Para fins de simulação em escala urbana é importante possuir uma boa precisão da modelagem, as despesas gerais computacionais e a disponibilidade de dados. O modelo térmico do *CitySim* foi baseado na analogia de um circuito elétrico, mais especificamente em uma rede resistor-capacitor (Nayak & Sharma, 2019).

O principal meio para a troca de dados entre a interface gráfica e o solucionador, é mediante um arquivo XML. O cálculo do solucionador compreende quatro partes em sequência. Em primeiro lugar, ele lê o arquivo XML e cria a cena; definida pelos objetos C++ que descrevem os edifícios, zonas e sistemas de plantas associados. O segundo estágio envolve uma sequência de pré-processos para o modelo de radiação. Isso envolve, por exemplo, criar uma distribuição de brilho do céu e determinar a posição do sol para cada hora e calcular os fatores de visão para as matrizes dos modelos de cada superfície da cena. Em terceiro lugar, é lançada a simulação, na qual cada modelo é chamado em sequência a partir de um *loop* principal para cada hora e para cada *building*/zona térmica. Os resultados são finalmente gravados em um arquivo ASCII e lidos pela GUI para a interpretação dos usuários (Kämpf & Robinson, 2009).

2.3 Exemplos de utilização do *CitySim*

Kämpf e Robinson (2009), idealizadores do *CitySim*, utilizaram o programa como avaliador de desempenho aplicado a um local de estudo na cidade de Basilea, na Suíça. Em seu trabalho foram examinados treze parâmetros físicos associados a vinte e seis edifícios, que foram agrupados por data de construção e status de proteção. O algoritmo de otimização demonstrou um bom desempenho em comparação a outros algoritmos e funções de referência padrão. Além disso, os resultados obtidos foram fisicamente compreensíveis, satisfatórios e compatíveis com o esperado, porém foram limitadas em espoco. Segundo os autores, os próximos passos que farão no desenvolvimento do *CitySim*, será de modelar uma variedade de sistemas de conversão de energia, além de incluir os custos e as implicações energéticas incorporadas das medidas de renovação, a fim de proporcionar uma base mais completa para a otimização do desempenho.

Nayak e Sharma (2019), utilizaram o *CitySim* em um estudo de caso no bairro de Alt-Wiedikon, na cidade de Zurique, na Suíça. O modelo escolhido foi um bairro residencial com 123 edifícios. O *software* foi utilizado para examinar dois tipos de padrões de crescimento no bairro, foi concluído que o modelo *CitySim* pode ser uma ótima ferramenta para prever os padrões de crescimento urbano em diferentes situações. Além disso, foi demonstrado que o desenho urbano, se aplicado com a eficiência imposta, facilitará a realização do objetivo de desenvolvimento compacto e imobiliário. Nayak e Sharma (2019), concluem que o *CitySim* foi aprovado com sucesso.

Robinson *et al.* (2009) aplicaram os principais modelos do *CitySim* (térmico, radiação e comportamentais) a um grupo de edifícios no distrito de Matthäus, em Basileia, na Suíça. Os autores utilizaram de um modelo 3D fornecido pela cidade e complementaram a descrição física dos edifícios com dados do censo nacional de 2000. Com o auxílio da data de construção e o estado de renovação foi atribuído características físicas as paredes, telhados e janelas. Foi obtido a irradiância média das superfícies, para determinados dias e horas, além das temperaturas internas médias dos edifícios e as demandas ideais de aquecimento e resfriamento, ao longo do ano de hora em hora.

Paralelamente ao trabalho citado no desenvolvimento do solucionador principal para o *CitySim*, Robinson *et al.* (2009) também desenvolveram de uma série de recursos de modelagem complementares para aprimorar o escopo do *CitySim*. Entre eles estão:

- Atribuição de objeto adicional: considerar o conteúdo energético incorporado dos materiais, para facilitar a análise de energia do ciclo de vida;
- Outros fluxos de recursos: desenvolvimento de um modelo simplificado de fluxos de água;
- Modelagem climática urbana: um modelo macro, meso e de cobertura urbana completamente acoplado pode ser usado para prever os campos de temperatura, vento e pressão em uma cidade, levando em consideração não apenas os edifícios que a compõem, mas também as escalas que são maiores que a própria cidade.
- Algoritmos evolutivos: integração de uma ferramenta interativa no *CitySim*, com a qual os utilizadores poderão selecionar parâmetros a otimizar, juntamente com a gama restrita de valores que podem assumir e os critérios com que a aptidão global deve ser julgada;
- Análise de incerteza: serão disponibilizadas uma facilidade na interface gráfica para definir as incertezas dos parâmetros aos quais as previsões são consideradas particularmente sensíveis e para selecionar esses parâmetros para efeitos da simulação.

Desde modo, pela facilidade de utilização e pelo acesso ao *software* o *CitySim* será a ferramenta a ser utilizada neste estudo.

3. METODOLOGIA

3.1 Local de estudo

Viseu é uma cidade portuguesa pertencente à região do Centro (Figura 6), sendo a maior cidade da região, pertence ao distrito de Viseu e capital da sub-região de Viseu Dão-Lafões (Figura 7). Viseu está situada em um planalto rodeado por serras e possui em torno de 510 km² de área e 100.000 habitantes.

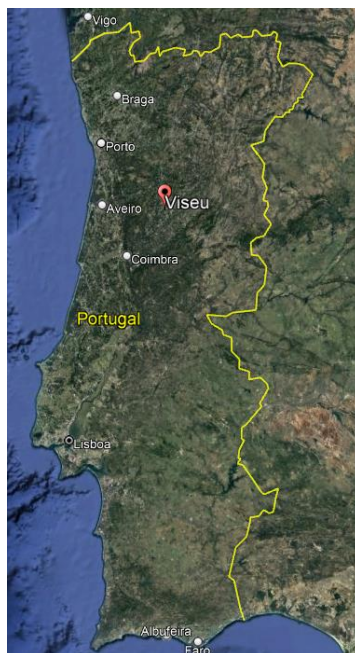


Figura 6 – Localização de Viseu no mapa de Portugal.
Fonte: *Google Earth Pro*, 2023.

Viseu Dão Lafões



Figura 7 – Mapa da sub-região de Viseu Dão-Lafões.
Fonte: Jornal do Centro, 2022.

O clima de Viseu, figura 8, é mediterrânico com influência continental e marítima, sendo caracterizado por quatro estações bem definidas. O inverno começa em 21 de dezembro e vai até 20 de março, sendo caracterizado por um clima úmido e frio, com temperaturas médias mensais de 7°C e meses com muitos ventos, especialmente janeiro. A primavera, que se inicia em 20 de março e se estende até 21 de junho, possui um clima ameno, com máximas que podem chegar 30°C e as mínimas a 3°C e as precipitações são concentradas em março e abril. Já o verão, 21 de junho até 23 de setembro, é quente e seco, com temperaturas chegando a 33°C, além disso os dias são mais longos, amanhecendo por voltas das 5h e anoitecendo às 22h. Por fim, o outono que acontece de 23 de setembro até 21 de dezembro, possui como características um clima úmido e fresco, com precipitações volumosas concentradas em novembro e dezembro (DEC, 2023).

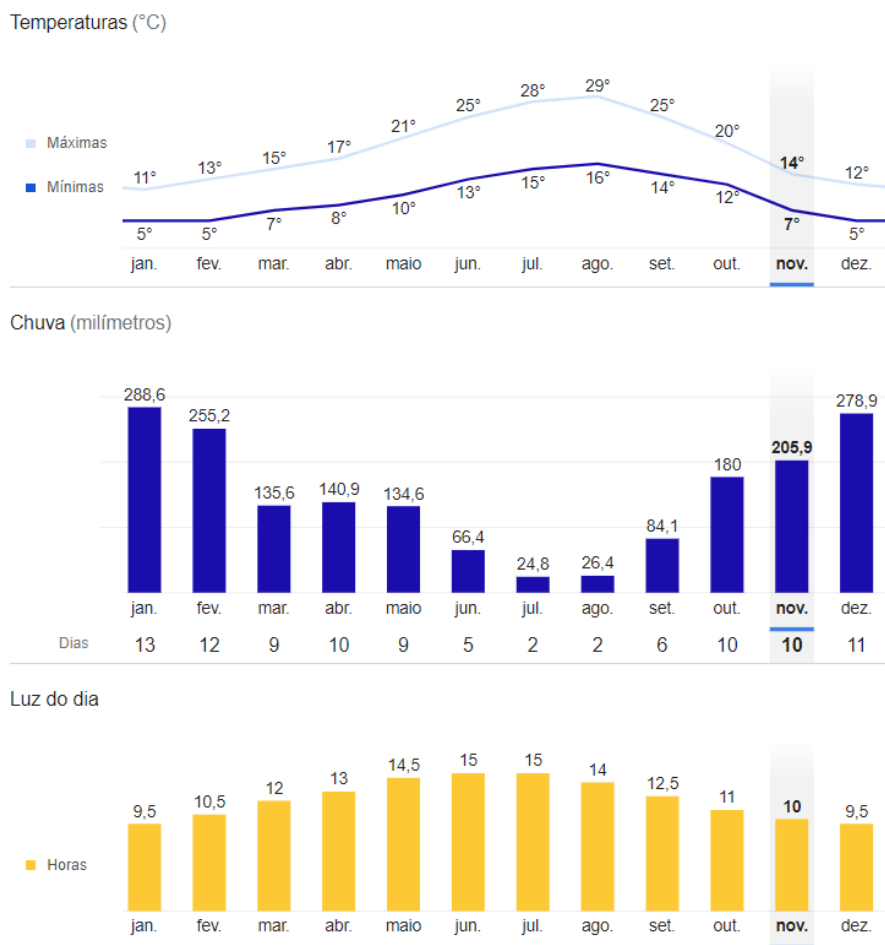


Figura 8 – Clima de Viseu.
 Fonte: NOAA, 2023.

Viseu como cidade não nasceu de um projeto urbano prévio e regular, mas de um crescimento natural, de formação medieval, que respondeu de forma natural às carências da população. A cidade passou por transformações no século XVI e principalmente nos séculos XVII e XVIII (Jesus, 2015).

O local de estudo é composto por 29 prédios, que estão localizados no centro histórico de Viseu, mais especificamente entorno da Praça de D. Duarte e da Rua Grão Vasco. Na figura 9, a área em estudo está delimitada a vermelho.



Figura 9 – Vista área do local de estudo.
Fonte: *Google Earth Pro*, 2023.

Na questão histórica, existem vestígios de utilização do local desde a Proto-Histórica. Devido à sua posição estratégica, centro natural de um planalto entre serras, acredita-se que um povoado habitou o local estudado. Com a chegada dos romanos, na Idade Antiga, ocorreram mudanças radicais, surgindo um espaço estruturalmente urbano e seguindo as normas urbanistas romanas, o local passou a ser o centro político, religioso, administrativo e social, denominado de fórum. Durante a Idade Média, Visu foi palco de diversos conflitos e ataques de tropas militares, passando por uma variedade de religiões e organizações. Na Idade Moderna ocorreu a reedificação da malha urbana, ocorrendo a renovação das moradas. Na sequência, durante a Idade Contemporânea a configuração do centro histórico começa a mudar, ocorrendo a renovação da atual Praça de D. Duarte em 1796. Já em 1914 dá-se importância ao centro histórico como ponto de interesse turístico e ao seu patrimônio (Jesus, 2015). Atualmente, a região funciona com atividades comerciais nos pisos térreos e como habitação nos demais andares (Figura 10).



Figura 10 – Prédios do local de estudo.

3.2 Configuração da simulação

A simulação apresentada neste trabalho utiliza o *software CitySim* para simular o microclima da cidade de Viseu. A atividade necessitou de outros *softwares* (Autocad e Sketchup) para realizar a modelação dos prédios e a criação de um arquivo climático. A simulação aborda 29 prédios, de diferentes áreas, alturas, número de pisos, sacadas e coberturas, que precisaram ser adaptadas, para facilitar a modelagem.

3.2.1 Modelação

Para a simulação foi necessário criar o modelo 3D dos prédios selecionados para o estudo. Para isso, inicialmente realizou-se a criação da base dos prédios com o uso do *software* AutoCAD. Para auxiliar no processo de desenho, uma imagem do Google Maps (Figura 11) foi importada para o AutoCAD. Para realizar o contorno dos prédios de interesse foi utilizando o

comando “polilinha”, conforme figura 9. Para facilitar na modelação considerou-se que todas as linhas eram retas. Após o fim dos contornos, a imagem foi excluída e as linhas foram transformadas em um único bloco, através do comando “bloco” para deixar o desenho na escala correta e em metros (Figura 12). As medidas adotadas foram obtidas através do comando “régua” do aplicativo do *Google Earth Pro*.



Figura 11 – Contorno dos prédios do estudo.

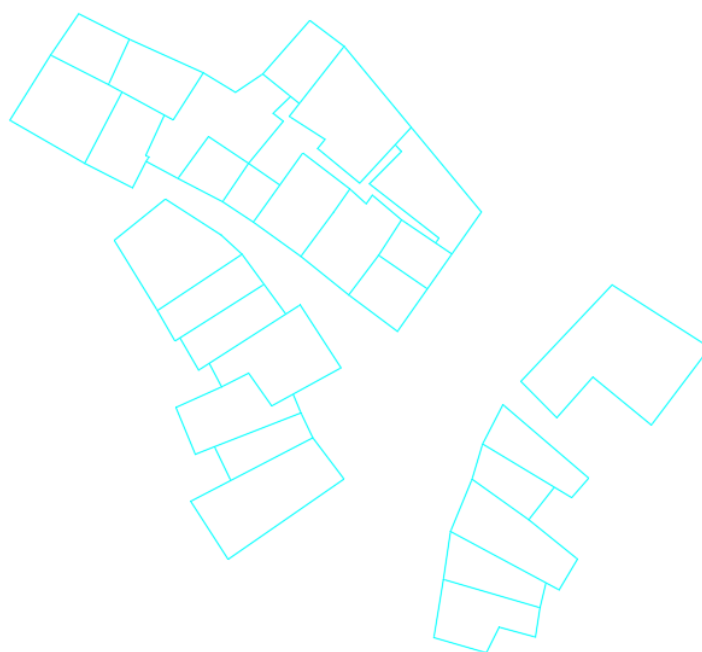


Figura 12 – Desenho base dos prédios do estudo.

Após a criação da base, o arquivo foi exportado para o *software SketchUp*. Nesta ferramenta inicialmente foi utilizado o comando “*line*” para traçar linhas sob a base importada. Quando as linhas formam um elemento fechado, continuando, o programa cria automaticamente um plano (Figura 13). Desta forma, cada plano fechado é a representação em planta de um dos prédios. Na sequência, utilizando o comando “*Push/Pull*” foi adicionada a altura de cada edifício (Figura 14), novamente os valores foram levantados com a ajuda do aplicativo *Google Earth Pro*. No fim desse processo foram excluídas todas as linhas em excesso nas paredes que o programa criou durante o levantamento dos prédios. Para simplificar o modelo, foi desconsiderado os desníveis do terreno e assim considerado que todos os edifícios possuem suas bases à mesma cota, ou seja, no mesmo plano referencial.

O próximo passo foi a modelação dos telhados, que foram desenhados com base na planta do centro histórico de Viseu, fornecida pela Câmara Municipal de Viseu, que conta com o detalhamento das águas dos telhados (Figura 15). Outra simplificação de modelo foi realizada nesta etapa: os telhados com três ou mais águas foram considerados de duas águas, existindo assim na modelação apenas telhados de uma ou duas águas. A criação dos telhados foi realizada de forma manual, ou seja, cada telhado foi desenhado manualmente com o auxílio do comando “*line*”. Por fim, foram criadas “*tags*” para cada edifício. Com isso a parte da modelação geométrica dos edifícios ficou pronta para ser utilizada na simulação (Figura 16).

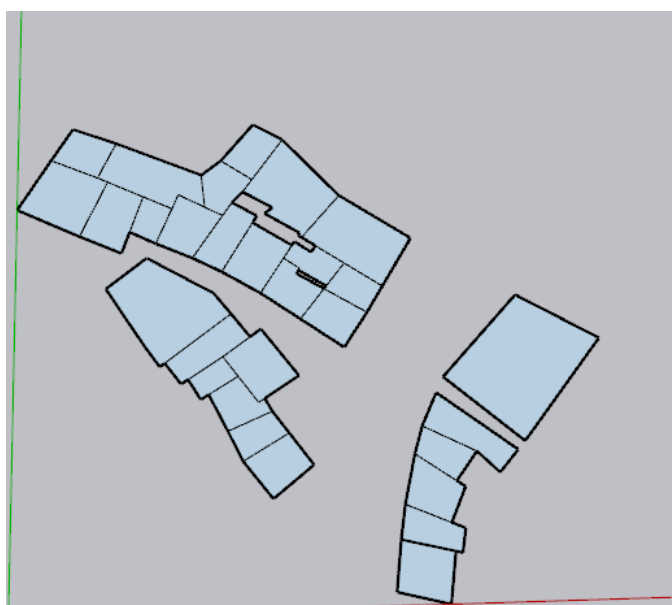


Figura 13 – Planta dos edifícios.

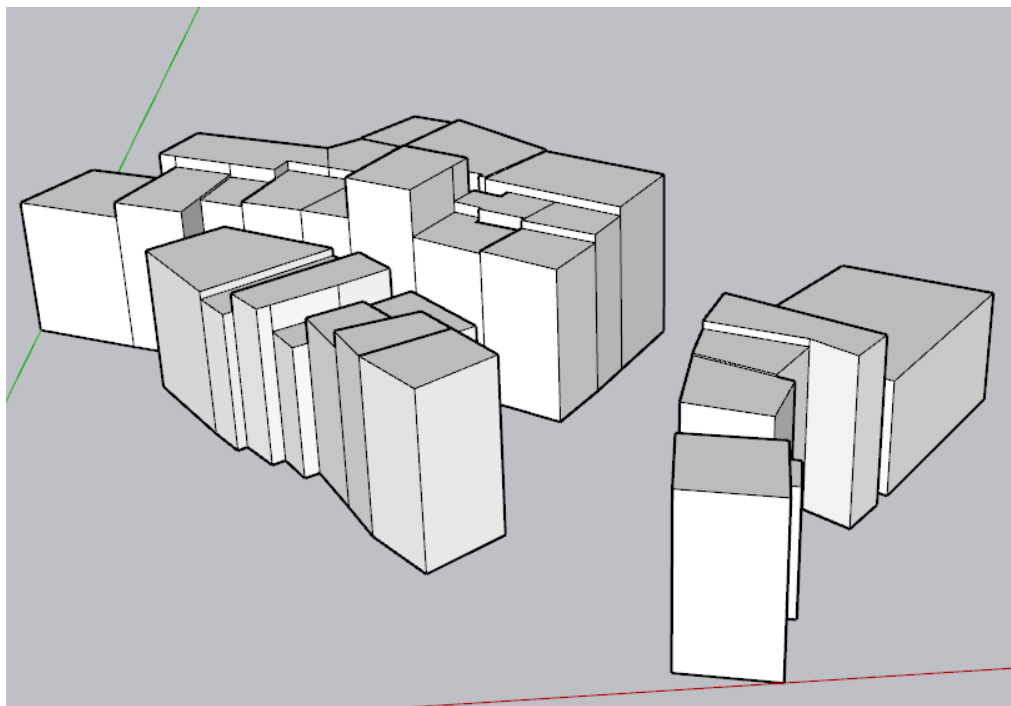


Figura 14 – Edifícios com altura real.



Figura 15 – Desenho do centro histórico de Viseu
Fonte: Câmara Municipal de Viseu, s/d.

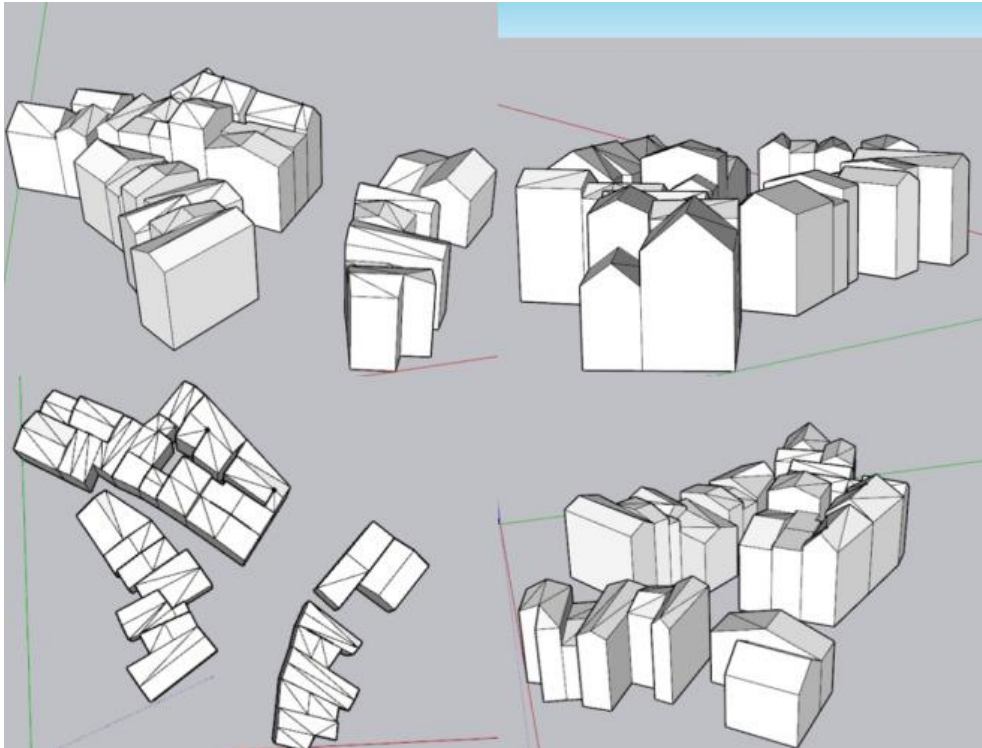


Figura 16 – Modelo tridimensional do centro histórico de Viseu.

3.2.2 Arquivo clima

Para realizar a simulação pelo programa *CitySim* é necessário um arquivo com extensão *.cli*, que contenha os dados climáticos devidamente organizados. Para a criação deste arquivo foi utilizado o *software Meteororm version 5.1* (Figura 17), para gerar um arquivo climático base com extensão *.dat*.

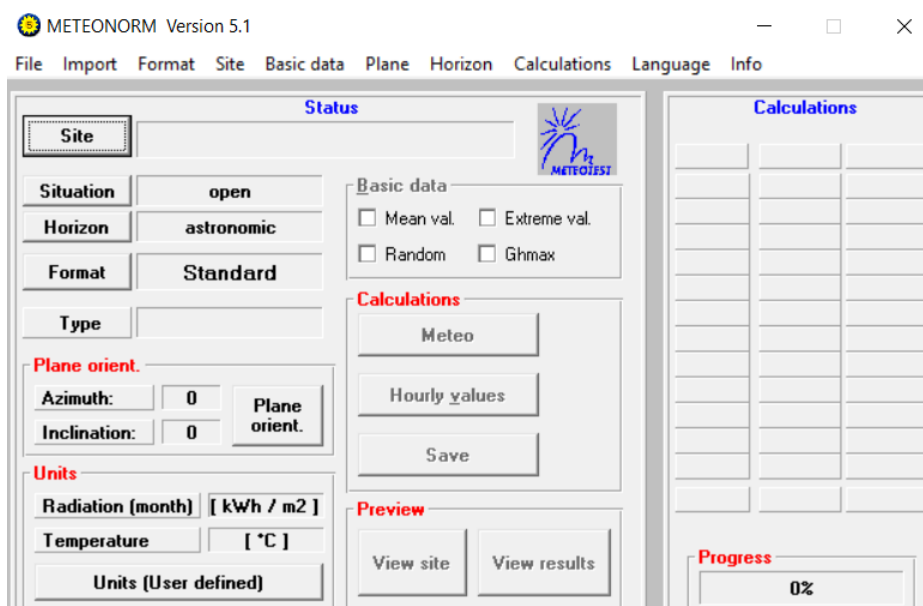


Figura 17 – Interface *Meteororm* 5.1.

O software *Meteonorm* oferece acesso aos dados do *Global Energy Balance Archive* (GEBA), que são fornecidos pelos serviços meteorológicos nacionais e atendem aos critérios de qualidade da Organização Meteorológica Mundial (*WMO*). Somado a isso, o *Meteonorm* gera anos típicos precisos e representativos para qualquer lugar do planeta. É possível escolher entre mais de 30 parâmetros climáticos diferentes e a base de dados consiste em mais de 8 000 estações meteorológicas, cinco satélites geoestacionários e uma climatologia de aerossóis calibrada globalmente. A partir desta base de dados e juntando modelos sofisticados de interpolação, é possível fornecer resultados com alta precisão para qualquer localização geográfica (*METEONORM*, s/d).

Inicialmente, utilizando a aba “*Units*”, foi configurado o sistema de variáveis e unidades para que seja compatível com o programa *CitySim* (Figura 18), escolhendo-se assim os parâmetros de interesse para o estudo. Na próxima interface, o próprio programa abre uma aba chamada “*Userdefined Output*”. Nesta etapa é que são escolhidas as variáveis de *Output*. Neste caso, foram selecionadas 12 variáveis (Figura 19). A sequência dos *Outputs* é importante, pois será mantida no arquivo de texto gerado pelo programa.

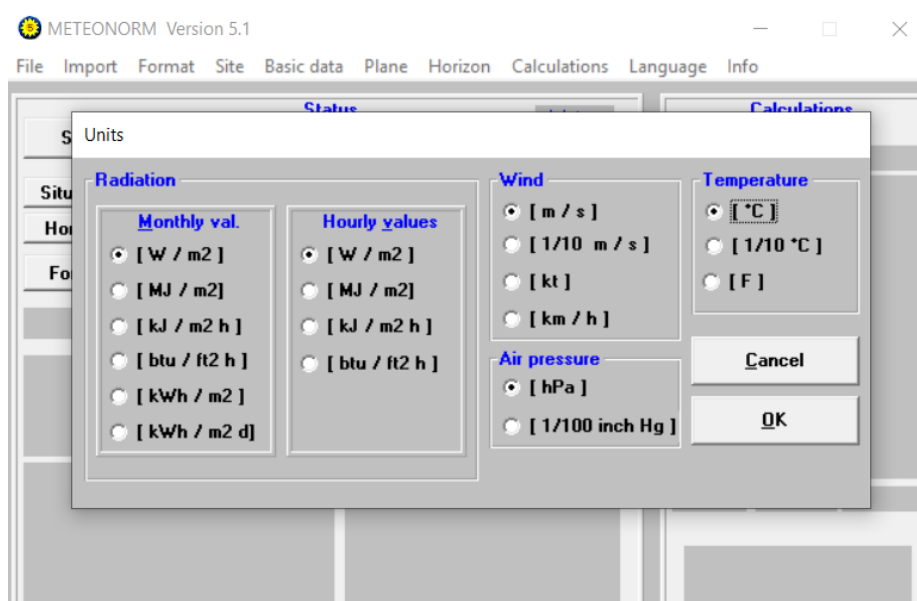


Figura 18 – Configuração do sistema de unidades.

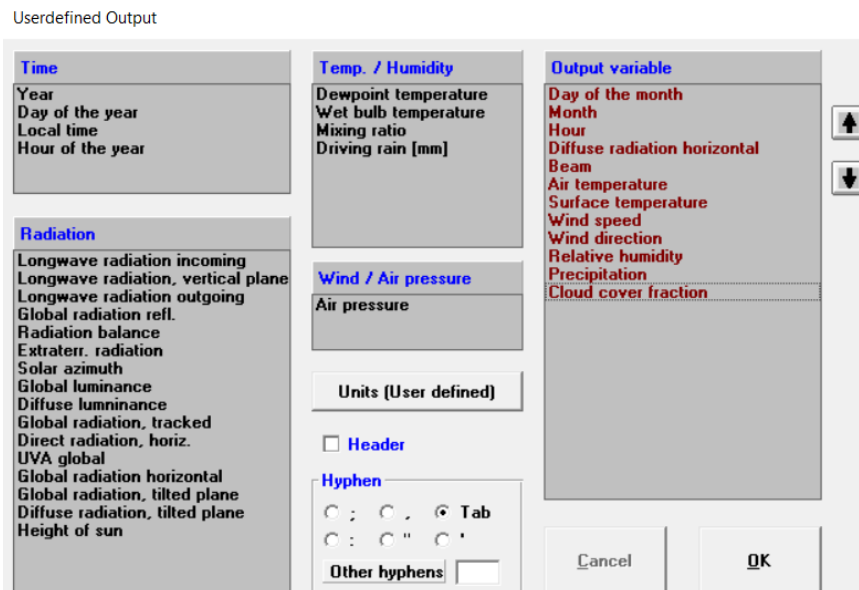


Figura 19 – Seleção das variáveis de output.

Na continuidade foi escolhida a localização “Viseu”, por meio da opção “Map” (Figuras 20 e 21). Nesta opção é necessário aproximar a região do globo desejada e na sequência clicar no local escolhido para selecioná-lo. Para auxiliar nessa seleção, o programa apresenta a longitude e a latitude dos locais conforme o cursor passa sobre eles. A escolha da localização teve que ser realizada desta forma, pois as estações meteorológicas pré-definidas pelo *Metenorm 5.1* para Portugal Continental são apenas oito, sendo elas: Bragança, Porto, Penhas Dourados, Coimbra, Castelo Branco, Lisboa, Évora e Faro. Desde modo, com a escolha efetuada o programa realiza uma interpolação dos dados das diferentes estações e assim obtém os valores do local escolhido.

A partir dos valores mensais (média de 10 anos), o *Meteonorm* calcula os valores horários de todos os parâmetros utilizando um modelo estocástico. As séries temporais resultantes correspondem a “anos típicos” utilizados para projeto. Por fim, no separador “Calculations” foi carregado o arquivo gerado (Figura 22) e na sequência baixado no formato texto com extensão *.dat*. O ficheiro obtido apresenta os dados escolhidos para cada hora dos 365 dias do ano, gerando-se assim um arquivo de 8 760 linhas, conforme amostra apresentada na figura 23.

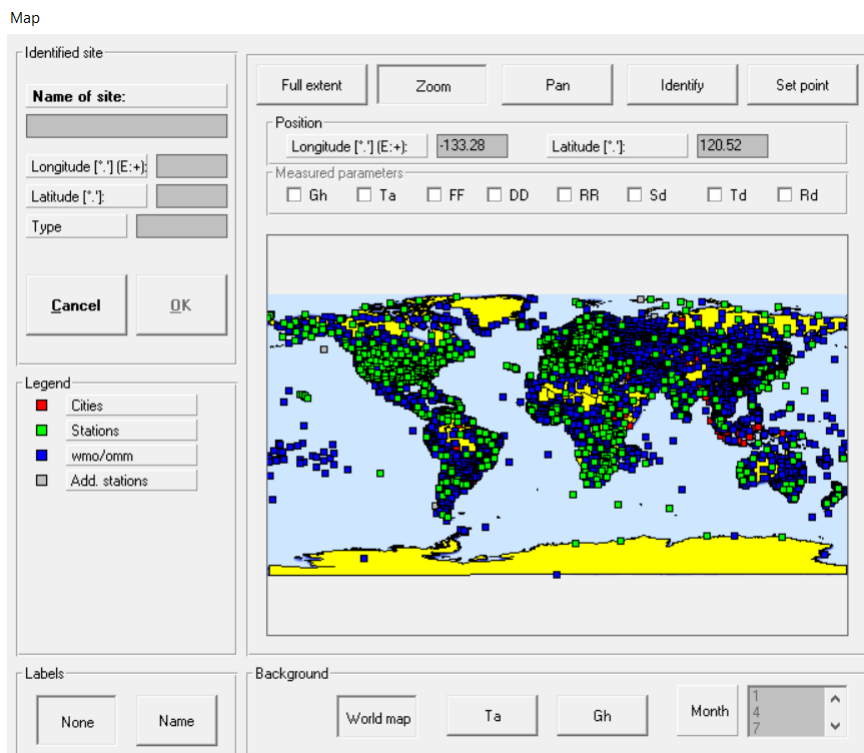


Figura 20 – Escolha da estação meteorológica.

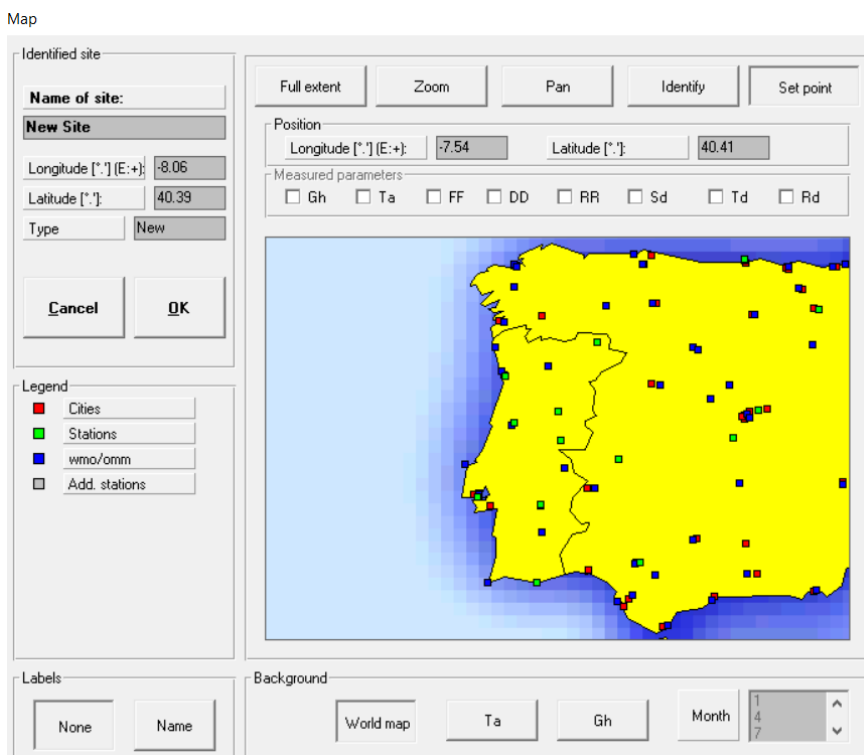


Figura 21 – Escolha da estação meteorológica.

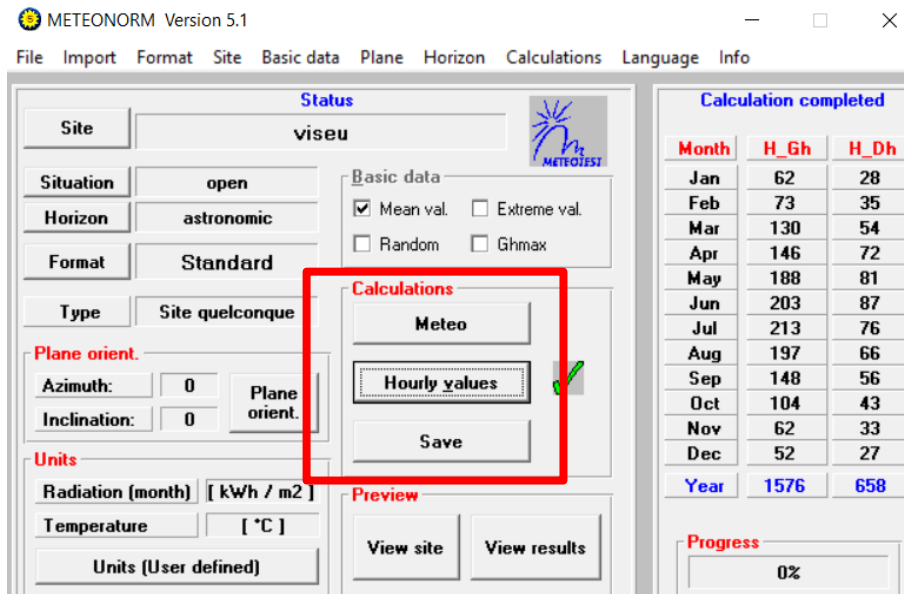


Figura 22 – Escolha da estação meteorológica.

1	1	1	0	0	10.8	8.0	1.4	218	94	17.3	8
1	1	2	0	0	10.5	7.5	1.0	207	94	1.2	8
1	1	3	0	0	10.3	7.1	0.7	249	95	1.4	8
1	1	4	0	0	10.1	7.1	1.0	265	96	0.8	8
1	1	5	0	0	9.9	6.8	1.0	263	97	0.4	8
1	1	6	0	0	9.6	6.8	1.3	252	98	0.1	8
1	1	7	0	0	9.4	6.4	1.0	231	99	0.5	8
1	1	8	9	0	9.7	9.2	1.8	237	98	0.1	8
1	1	9	27	0	9.9	9.6	1.3	214	97	0.0	8
1	1	10	83	0	10.5	10.7	3.3	253	95	0.3	8
1	1	11	122	0	11.0	11.7	2.4	50	93	0.6	8
1	1	12	124	0	11.4	12.0	2.2	226	91	0.0	8
1	1	13	32	0	11.1	10.8	2.7	190	92	0.0	8
1	1	14	74	0	11.1	11.3	3.1	58	92	0.2	8
1	1	15	38	0	11.0	10.8	2.4	55	92	0.2	8
1	1	16	34	0	10.8	10.6	4.0	221	93	1.0	8
1	1	17	0	0	10.7	8.6	2.7	36	93	2.1	8
1	1	18	0	0	10.5	8.6	3.1	155	93	4.2	8
1	1	19	0	0	10.4	8.0	2.2	97	93	8.2	8
1	1	20	0	0	10.2	7.9	2.2	191	93	2.6	8
1	1	21	0	0	10.0	7.8	2.4	204	92	5.6	8
1	1	22	0	0	9.9	7.1	1.4	165	92	3.3	8
1	1	23	0	0	9.7	6.7	1.0	220	92	1.7	8
1	1	24	0	0	9.5	6.4	0.8	216	91	0.1	8
2	1	1	0	0	9.1	6.1	1.0	247	93	0.2	8
2	1	2	0	0	8.7	6.4	2.2	220	94	1.4	8
2	1	3	0	0	8.4	6.7	3.7	190	95	0.4	8
2	1	4	0	0	8.0	6.1	3.1	20	96	0.0	8
2	1	5	0	0	7.6	6.0	4.0	97	97	0.1	8
2	1	6	0	0	7.2	5.2	2.9	35	98	0.0	8
2	1	7	0	0	6.8	5.1	3.5	97	99	0.0	8
2	1	8	29	124	7.8	7.6	1.6	29	95	0.0	8
2	1	9	99	125	8.9	9.6	2.1	219	90	0.0	8
2	1	10	149	107	9.8	11.1	1.8	181	87	0.0	8
2	1	11	188	220	10.9	13.1	2.1	192	83	0.0	7
2	1	12	213	97	11.4	13.5	1.4	211	81	0.0	8
2	1	13	188	110	11.7	13.4	2.4	221	80	0.0	8
2	1	14	35	0	10.8	10.5	2.9	196	83	0.0	8
2	1	15	101	108	10.6	11.3	1.8	105	84	0.0	7
2	1	16	33	0	10.0	9.7	2.7	202	86	0.0	7
2	1	17	0	0	9.7	7.3	2.0	201	87	0.0	7

Figura 23 – Amostra do início do arquivo .dat obtido por meio do *Meteonorm version 5.1*.

Com o arquivo inicial pronto, foi adicionado a ele um cabeçalho contendo a localização geográfica de Viseu, ou seja, latitude, longitude, nível em relação ao mar e UTC (Tempo Universal Coordenado), conforme Tabela 2. Além disso, foi adicionada a sigla de cada coluna

- a relação da sigla com os *outputs* está detalhada na Tabela 3. Por fim, o arquivo foi alterado para o formato texto com extensão *.cli*, sendo este o arquivo utilizado na simulação (Figura 25).

Tabela 2 – Informações do cabeçalho do arquivo climático.

Latitude	-7,54
Longitude	+40,38
Nível acima do mar	494 metros
UTC	0

Tabela 3 – Dados meteorológicos.

Sigla	Definição	Unidades
d	Dia	-
m	Mês	-
h	Hora	-
G_Dh	Irradiância horizontal difusa	W/m ²
G_Bn	Irradiância normal do feixe	W/m ²
Ta	Temperatura do ar	°C
Ts	Temperatura do solo	°C
FF	Velocidade do vento	EM
DD	Direção do vento	°
RH	Umidade relativa	%
RR	Precipitação	Milímetros
N	Nebulosidade	octa

Viseu
-7.54,40.38,494,0

dm	m	h	G_Dh	G_Bn	Ta	Ts	FF	DD	RH	RR	N
1	1	1	0	0	10.8	0.0	1.4	218	94	17.3	8
1	1	2	0	0	10.5	0.0	1.0	207	94	1.2	8
1	1	3	0	0	10.3	0.0	0.7	249	95	1.4	8
1	1	4	0	0	10.1	0.0	1.0	265	96	0.8	8
1	1	5	0	0	9.9	0.0	1.0	263	97	0.4	8
1	1	6	0	0	9.6	0.0	1.3	252	98	0.1	8
1	1	7	0	0	9.4	0.0	1.0	231	99	0.5	8
1	1	8	9	0	9.7	4.6	1.8	237	98	0.1	8
1	1	9	27	0	9.9	13.1	1.3	214	97	0.0	8
1	1	10	83	0	10.5	19.9	3.3	253	95	0.3	8
1	1	11	122	0	11.0	24.5	2.4	50	93	0.6	8
1	1	12	124	0	11.4	26.2	2.2	226	91	0.0	8
1	1	13	32	0	11.1	25.0	2.7	190	92	0.0	8
1	1	14	74	0	11.1	20.9	3.1	58	92	0.2	8
1	1	15	38	0	11.0	14.4	2.4	55	92	0.2	8
1	1	16	34	0	10.8	6.1	4.0	221	93	1.0	8
1	1	17	0	0	10.7	0.0	2.7	36	93	2.1	8
1	1	18	0	0	10.5	0.0	3.1	155	93	4.2	8
1	1	19	0	0	10.4	0.0	2.2	97	93	8.2	8
1	1	20	0	0	10.2	0.0	2.2	191	93	2.6	8
1	1	21	0	0	10.0	0.0	2.4	204	92	5.6	8
1	1	22	0	0	9.9	0.0	1.4	165	92	3.3	8
1	1	23	0	0	9.7	0.0	1.0	220	92	1.7	8
1	1	24	0	0	9.5	0.0	0.8	216	91	0.1	8
2	1	1	0	0	9.1	0.0	1.0	247	93	0.2	8
2	1	2	0	0	8.7	0.0	2.2	220	94	1.4	8
2	1	3	0	0	8.4	0.0	3.7	190	95	0.4	8
2	1	4	0	0	8.0	0.0	3.1	20	96	0.0	8
2	1	5	0	0	7.6	0.0	4.0	97	97	0.1	8
2	1	6	0	0	7.2	0.0	2.9	35	98	0.0	8
2	1	7	0	0	6.8	0.0	3.5	97	99	0.0	8
2	1	8	29	124	7.8	4.6	1.6	29	95	0.0	8
2	1	9	99	125	8.9	13.1	2.1	219	90	0.0	8
2	1	10	149	107	9.8	20.0	1.8	181	87	0.0	8
2	1	11	188	220	10.9	24.5	2.1	192	83	0.0	7
2	1	12	213	97	11.4	26.3	1.4	211	81	0.0	8

Figura 24 – Início do arquivo do clima *.cli*.

3.2.3 Caracterização construtiva

Para a simulação térmica e energética de prédios e ambientes, é indispensável uma correta caracterização construtiva dos elementos para a obtenção de um resultado claro e real, pois, obviamente, influencia diretamente nas trocas de calor entre o ambiente e o meio externo. Como o local de estudo é uma região histórica de Portugal, os prédios foram construídos com técnicas e materiais típicos da época, sendo bastante diferentes das práticas construtivas atuais, nomeadamente no que se refere aos métodos de construção das paredes exteriores.

Para realizar a configuração dos materiais no *software CitySim* é preciso encontrar o arquivo respetivo, que está disponível numa sequência de pastas, nomeadamente: “CitySimPro”, “Windows”, “Resources”. Por fim, na pasta “defaults”, encontra-se o ficheiro “CitySimDatabase.xml”. Este documento é um arquivo de texto e nele se encontra, entre outros aspetos, uma lista com vários materiais de construção (Figura 25). Cada material contém as seguintes informações: um número de identificação, nome, densidade, calor específico e condutibilidade térmica.

```

CitySimDatabase.xml - Bloco de Notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda

<HVAC id="1" name="Default HVAC" system="Standard" ventilation="mechanical" heatExchEff="0.8" moistExchEff="0.8" coilFactor="0.6"
coilADPT="0.6" coilEff="0.6" isSteamHumid="false" isEvapCooling="true" ductPickup="1.0" fanPickup="2.6" fanPower="4.12"
FAR="8" hydroThermalWheel="0" tMaxSupply="3245.61" tMinSupply="23423.12" deltaT="1"/>

<MaterialType id="1" name="Air (CEN)" color="-1" icon="Blue.jpg">
  <Material id="1" name="Air layer" Density="1.23" Cp="1000.8" Conductivity="0.025"/>
</MaterialType>
<MaterialType id="2" name="Concrete (CEN)" color="-1" icon="Concrete.jpg">
  <Material id="29" name="Cast concrete 1800 kg/m2 CEN" Density="1800" Cp="1000" Conductivity="0.9"/>
  <Material id="31" name="Cast concrete 2200 kg/m2 CEN" Density="2200" Cp="1000" Conductivity="1.6"/>
  <Material id="33" name="Concrete, reinforced with 1% of steel" Density="2300" Cp="1000" Conductivity="2.3"/>
  <Material id="30" name="Cast concrete 2000 kg/m2 CEN" Density="2000" Cp="1000" Conductivity="1.2"/>
  <Material id="34" name="Concrete, reinforced with 2% of steel" Density="2400" Cp="1000" Conductivity="2.5"/>
  <Material id="126" name="Reinforced concrete" Density="2400" Cp="1100" Conductivity="1.8"/>
  <Material id="32" name="Cast concrete 2400 kg/m2 CEN" Density="2400" Cp="1000" Conductivity="2"/>
</MaterialType>
<MaterialType id="3" name="Concrete (Lesosai8TK)" color="-1" icon="Concrete.jpg">
  <Material id="347" name="beton test dyn" Density="2400" Cp="999.972" Conductivity="1.8"/>
</MaterialType>
<MaterialType id="4" name="Concrete (MaterialsDB)" color="-1" icon="Concrete.jpg">
  <Material id="337" name="Lightweight concrete with sand 800-2000 kg/m3" Density="1400" Cp="1000" Conductivity="1.8"/>
  <Material id="338" name="Lightweight concrete without sand 500-2000 kg/m3" Density="1300" Cp="1000" Conductivity="1.5"/>
  <Material id="330" name="Concrete with polystyrene aggregate 500-900 kg/m3" Density="700" Cp="1000" Conductivity="0.4"/>
  <Material id="331" name="Concrete with blast furnace slag 400-1400 kg/m3" Density="900" Cp="1000" Conductivity="0.65"/>
  <Material id="329" name="Concrete with pumic 500-1300 kg/m3" Density="900" Cp="1000" Conductivity="0.52"/>
</MaterialType>
<MaterialType id="5" name="Concrete (MinergieECO)" color="-1" icon="Concrete.jpg">
  <Material id="372" name="Armed concrete, C30/37, 90kg/m3" Density="2443" Cp="1004.4" Conductivity="2.3"/>
  <Material id="381" name="Concrete C8/10" Density="2190" Cp="990" Conductivity="0.9"/>
  <Material id="360" name="Armed concrete, C30/37, 80kg/m3" Density="2436" Cp="1004.4" Conductivity="2.3"/>
  <Material id="369" name="Armed concrete, C30/37, 105 kg/m3" Density="2453" Cp="1004.4" Conductivity="2.35"/>
  <Material id="387" name="Armed concrete, C30/37, 60kg/m3" Density="2362" Cp="1004.4" Conductivity="2.5"/>
  <Material id="385" name="Armed concrete, C25/30, 80kg/m3" Density="2441" Cp="1004.4" Conductivity="2.3"/>
</MaterialType>
<MaterialType id="6" name="Concrete (SIA 381-1)" color="-1" icon="Concrete.jpg">
  <Material id="264" name="Reinforced concrete (with 2% steel)" Density="2400" Cp="1000.8" Conductivity="2.5"/>
  <Material id="165" name="Expanded clay concrete 1700 kg/m3" Density="1700" Cp="1100" Conductivity="1"/>
  <Material id="263" name="Reinforced concrete (with 1% steel)" Density="2300" Cp="1004.4" Conductivity="2.3"/>
  <Material id="265" name="Concrete lighth granulate" Density="1000" Cp="1000.8" Conductivity="0.3"/>
  <Material id="164" name="Expanded clay concrete 1500 kg/m3" Density="1500" Cp="1100" Conductivity="0.7"/>
  <Material id="163" name="Expanded clay concrete 1250 kg/m3" Density="1250" Cp="1100" Conductivity="0.5"/>

```

Figura 25 – Início do arquivo de material.

Após a atualização da lista de materiais necessários para o modelo, inicia-se a definição das categorias das composições, podendo os elementos ser classificados em parede (Figura 26), telhado e piso. Nesta área é possível a criação da composição dos elementos construtivos a partir dos materiais definidos anteriormente. Cada “composição” é identificada por um número, nome e a sua classificação (parede, piso ou telhado). Em seguida, são inseridos os materiais na sua ordem, da parte externa para a interna. Ao lado de cada material é adicionada a sua espessura em metros, caso o material seja isolante é adicionado o termo “*insulation="true"*”.

```

CitySimDatabase.xml - Bloco de Notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda

<CompositeCategory id="1" name="Wall" icon="">
  <Composite id="4" name="LesosaiBTK W 1" color="-16776961" category="Wall">
    <Compositelayer materialID="168" thickness="0.02"/>
    <Compositelayer materialID="220" thickness="0.16" insulation="true"/>
    <Compositelayer materialID="212" thickness="0.0001"/>
    <Compositelayer materialID="142" thickness="0.2"/>
    <Compositelayer materialID="167" thickness="0.02"/>
  </Composite>
  <Composite id="5" name="LesosaiBTK W 2" color="-16776961" category="Wall">
    <Compositelayer materialID="168" thickness="0.02"/>
    <Compositelayer materialID="220" thickness="0.16" insulation="true"/>
    <Compositelayer materialID="140" thickness="0.25"/>
  </Composite>
  <Composite id="6" name="LesosaiBTK W 4" color="-16776961" category="Wall">
    <Compositelayer materialID="168" thickness="0.02"/>
    <Compositelayer materialID="220" thickness="0.16" insulation="true"/>
    <Compositelayer materialID="33" thickness="0.15"/>
  </Composite>
  <Composite id="7" name="LesosaiBTK W 12" color="-16776961" category="Wall">
    <Compositelayer materialID="33" thickness="0.05"/>
    <Compositelayer materialID="220" thickness="0.16" insulation="true"/>
    <Compositelayer materialID="33" thickness="0.2"/>
  </Composite>
  <Composite id="8" name="LesosaiBTK W 25" color="-16776961" category="Wall">
    <Compositelayer materialID="173" thickness="0.01"/>
    <Compositelayer materialID="220" thickness="0.16" insulation="true"/>
    <Compositelayer materialID="142" thickness="0.2"/>
    <Compositelayer materialID="167" thickness="0.02"/>
  </Composite>
  <Composite id="9" name="LesosaiBTK W 47" color="-16776961" category="Wall">
    <Compositelayer materialID="178" thickness="0.02"/>
    <Compositelayer materialID="1" thickness="0.04"/>
    <Compositelayer materialID="220" thickness="0.16" insulation="true"/>
    <Compositelayer materialID="250" thickness="0.0003"/>
    <Compositelayer materialID="11" thickness="0.1"/>
  </Composite>
  <Composite id="600" name="Viseu parede 1" color="-16776961" category="Wall">
    <Compositelayer materialID="168" thickness="0.025"/>
    <Compositelayer materialID="182" thickness="0.25"/>
    <Compositelayer materialID="168" thickness="0.025"/>
  </Composite>

```

Figura 26 – Início da parte de composição das paredes.

Desta forma, foram criadas as “composições” necessárias para a modelação das paredes, telhados e pisos, para os edifícios do caso em estudo. Os valores das propriedades dos materiais foram retiradas de LNEC (2006) e Mendonça (2005). As paredes são de granito (Figura 27), sendo assim considerados blocos de granito como principal material, com 0,25 m de espessura, possuindo uma condutibilidade térmica de 3,0 W/mK, uma densidade de 2900 kg/m³ e um calor

específico de $650 \text{ J}/(\text{K}.\text{kg})$. Além disso, considerou-se uma camada externa e uma interna de argamassa com areia com $0,025 \text{ m}$ de espessura, com condutibilidade térmica de $0,80 \text{ W}/\text{mK}$, $1600 \text{ kg}/\text{m}^3$ de densidade e $1046 \text{ J}/(\text{K}.\text{kg})$ de calor específico.

Já os telhados (Figura 28) foram considerados simples, com uma estrutura em madeira, possuindo a seguinte composição: telhas cerâmicas com $0,25 \text{ m}$, ($1,15 \text{ W}/\text{mK}$; $2000 \text{ kg}/\text{m}^3$; $1000 \text{ J}/(\text{K}.\text{kg})$), uma camada de ar com $0,02 \text{ m}$ ($0,025 \text{ W}/\text{mK}$; $1,23 \text{ kg}/\text{m}^3$; $1000 \text{ J}/(\text{K}.\text{kg})$) e por fim uma manta com $0,005 \text{ m}$ ($0,056 \text{ W}/\text{mK}$; $380 \text{ kg}/\text{m}^3$; $1400 \text{ J}/(\text{K}.\text{kg})$).

Para os pisos (Figura 29) foram considerados como sendo de madeira com espessura de $0,1 \text{ m}$ com $0,15 \text{ W}/\text{mK}$ de condutibilidade térmica, $750 \text{ kg}/\text{m}^3$ de densidade e $2510 \text{ J}/(\text{K}.\text{kg})$ de calor específico.

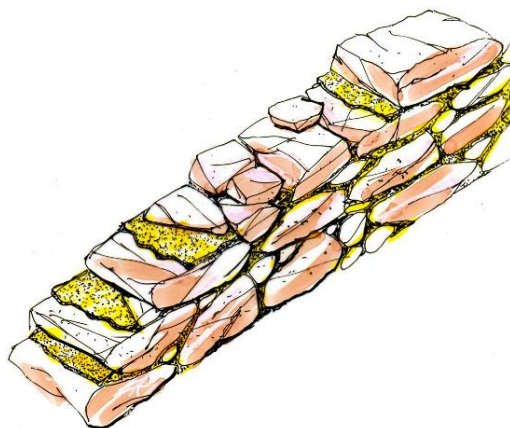


Figura 27 – Esquema de um elemento construtivo de parede de granito.
Fonte: Colin, 2010.

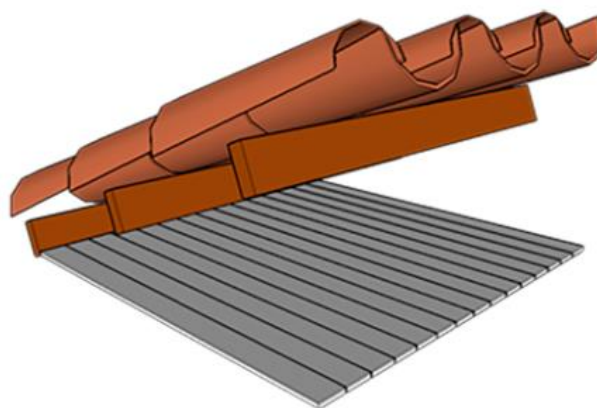


Figura 28 – Esquema do elemento construtivo telhado.
Fonte: Projeteee, 2023a.



Figura 29 – Esquema do elemento construtivo piso.
Fonte: Madipe, 2023.

3.3 Simulação

Para dar início à utilização do *CitySim* é preciso importar o arquivo de desenho gerado anteriormente. Para tal, foi necessário instalar um *plugin* próprio do *software* no *SketchUp* (Figura 30). Com a importação finalizada, o arquivo está pronto para ser utilizado (Figura 31), mas para iniciar a simulação é preciso adicionar algumas informações no *software* como o percentual de vidros de cada fachada, as propriedades do vidro, a refletância dos edifícios, a percentagem de abertura e o arquivo climático configurado anteriormente. Além dessas informações, é possível utilizar um perfil de horizonte para levar em consideração as obstruções do horizonte distante, este arquivo também deve ser criado. Como esta informação não é obrigatória, foi escolhido não a utilizar.

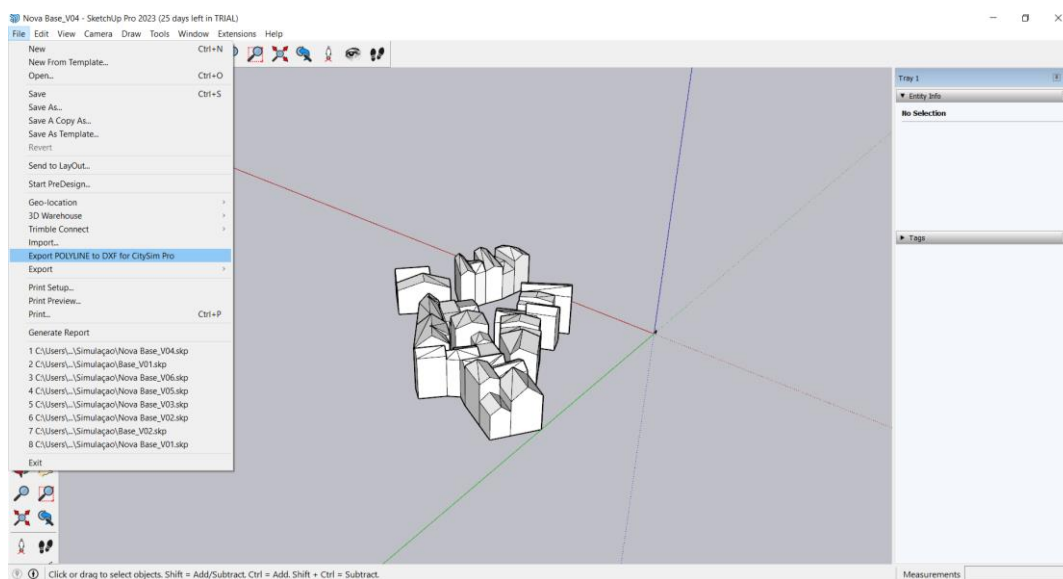


Figura 30 – Importação do desenho para o *CitySim*.

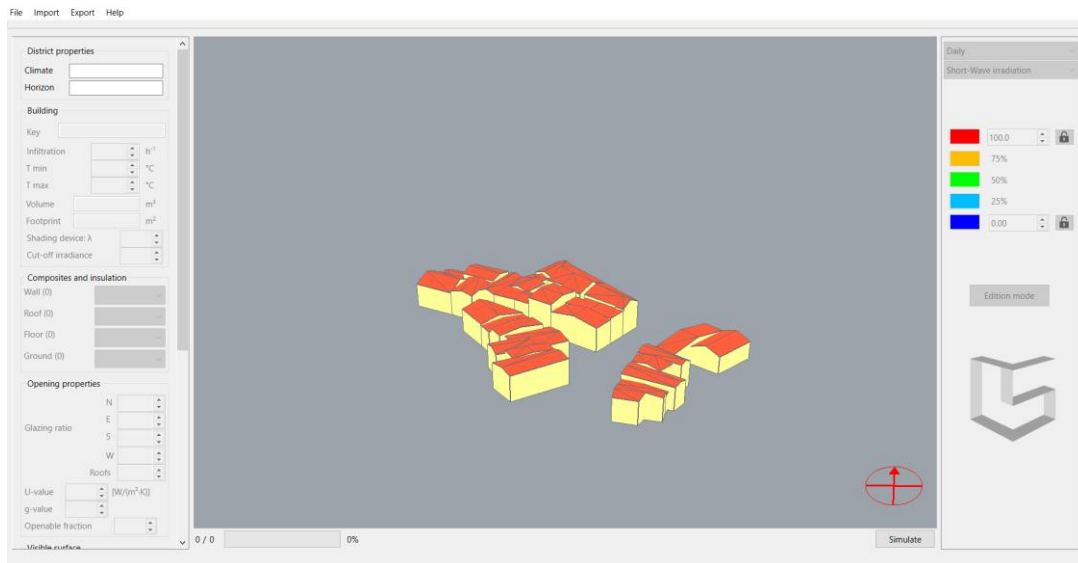


Figura 31 – Importação do desenho para o CitySim.

O percentual de vidros foi obtido dividindo a área de cada fachada (valor obtido por meio do *SketchUp*) pela soma das áreas de janelas e portas da mesma fachada (os valores foram obtidos a partir de dados obtidos num levantamento efetuado. Esta operação foi feita individualmente para cada parede.

Em relação ao vidro, foi considerado o uso de vidro simples com 6 mm de espessura, “Sgl Clr 6mm”, (Figura 32) para todas as aberturas. As propriedades utilizadas são o coeficiente de transmissão térmica (*U-value*) e o fator solar, *g-value*. Os valores adotados para estas propriedades estão na Tabela 4. Já para o grau de abertura de janelas foi considerado uma percentagem de 30%.

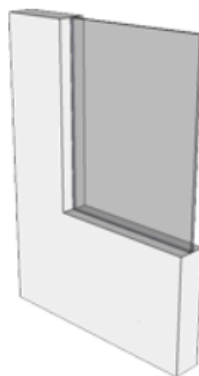


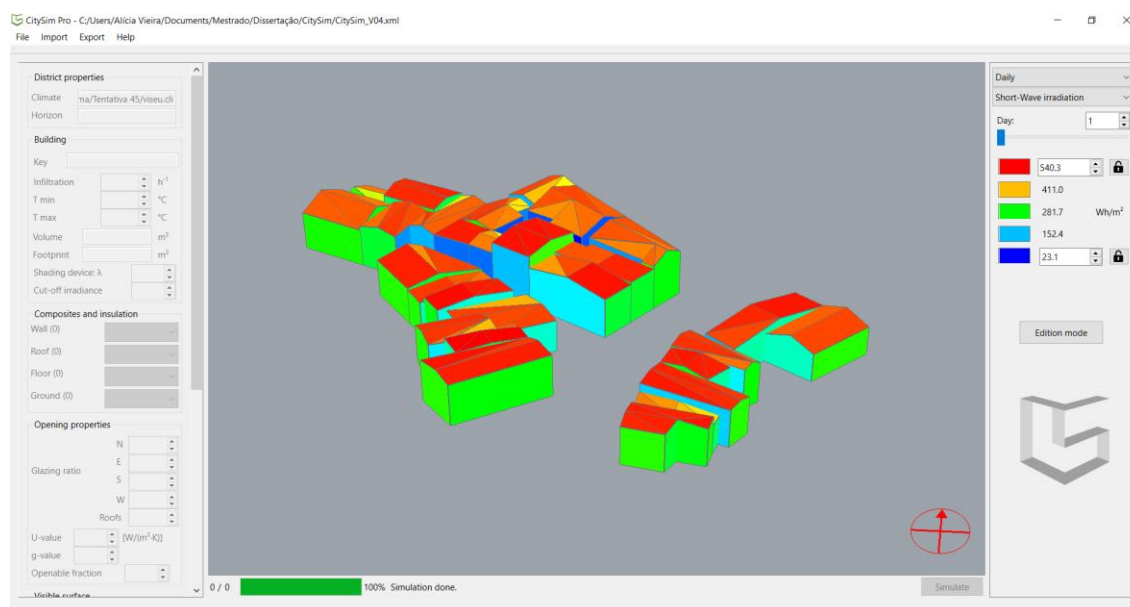
Figura 32 – Elemento construtivo do vidro.
 Fonte: Projeteee, 2023b.

Tabela 4 – Valores adotados para o vidro.

Propriedades	Valor adotado
<i>U-value</i>	5,78 W/m ² .K
<i>g-value</i>	0,88 (ou 88%)

No que se refere à refletância solar, que é a propriedade térmica que representa o quanto de energia solar é refletida por determinada superfície, ou seja, é o oposto da absorvância solar, sendo ambas expressas em percentagem ou adimensional. O principal fator que influencia essa propriedade é a cor do objeto. No caso de estudo, todas as paredes foram consideradas com cores claras e os telhados foram admitidos como telhas cerâmicas tradicionais. A partir disso, foi utilizado como base um estudo que relaciona cores de tinta com a respectiva absorvância solar (Dornelles, K. A. (2008), ver Anexo A). A partir dessa informação obteve-se o valor de 0,70 (zero vírgula setenta) para as paredes e de 0,30 (zero vírgula trinta) para os telhados.

Após adicionar as informações em cada fachada e telhado de forma manual, foi anexado o arquivo climático do local indicado e realizada a simulação. Após o processamento, o *software* apresenta os resultados no próprio modelo utilizando uma escala de cores. Na figura 33 é possível visualizar um exemplo dos resultados obtidos por meio do *CitySim*.

Figura 33 – Exemplo de resultados do *CitySim*.

Os resultados podem ser visualizados pela hora do ano, pelo dia do ano, mês do ano ou o ano. O *software* disponibiliza nove possíveis resultados, sendo eles:

- *Short-Wave irradiation* (irradiação de ondas curtas);

- *Long-Wave net irradiation* (irradiação líquida de ondas longas);
- *Surface temperatura* (temperatura da superfície);
- *PhotoVoltaic production* (produção fotovoltaica);
- *Solar Thermal production* (produção térmica solar);
- *Sky View Factor* (fator de visão do céu);
- *Heating demand* (demanda de aquecimento);
- *Cooling demand* (demanda de resfriamento);
- *Indoor temperature* (temperatura interna).

Entre os nove tipos, em alguns deles não se obteve resultados numéricos, nomeadamente: a produção fotovoltaica e a produção térmica solar, que necessitam de dados de placas solares; e a demanda de aquecimento e de resfriamento, que precisam de dados de ar-condicionado. Estes resultados não são adequados para o objetivo das simulações neste caso de estudo.

Além dos resultados por meio de mapa de cores, o *software* disponibiliza uma opção de exportar resultados, através de um ficheiro designado por “results TSV”. Utilizando essa opção são gerados 15 arquivos de formato texto com extensão *.tsv* (Figura 34). A descrição de cada pasta está presente na Tabela 5.






 CitySim.tsv_Area.tsv	24/08/2023 13:02	Arquivo TSV	1 KB
 CitySim.tsv_ClimaticData.tsv	24/08/2023 13:02	Arquivo TSV	404 KB
 CitySim.tsv_CM.tsv	24/08/2023 13:02	Arquivo TSV	9 KB
 CitySim.tsv_DL.tsv	24/08/2023 13:02	Arquivo TSV	22 KB
 CitySim.tsv_ET.tsv	24/08/2023 13:02	Arquivo TSV	9 KB
 CitySim.tsv_HC.tsv	24/08/2023 13:02	Arquivo TSV	17,502 KB
 CitySim.tsv_Inertia.tsv	24/08/2023 13:02	Arquivo TSV	1 KB
 CitySim.tsv_LW.tsv	24/08/2023 13:02	Arquivo TSV	20,134 KB
 CitySim.tsv_SW.tsv	24/08/2023 13:02	Arquivo TSV	10,481 KB
 CitySim.tsv_SWv.tsv	24/08/2023 13:02	Arquivo TSV	8 KB
 CitySim.tsv_TH.tsv	24/08/2023 13:02	Arquivo TSV	541 KB
 CitySim.tsv_TS.tsv	24/08/2023 13:02	Arquivo TSV	18,144 KB
 CitySim.tsv_VF.tsv	24/08/2023 13:02	Arquivo TSV	16 KB
 CitySim.tsv_YearlyResults.tsv	24/08/2023 13:02	Arquivo TSV	1 KB
 CitySim.tsv_YearlyResultsPerBuilding.tsv	24/08/2023 13:02	Arquivo TSV	1 KB

Figura 34 – Resultados gerados em formato de texto.

Tabela 5 – Descrição dos resultados em formato de texto.

Nome do arquivo	Descrição
_Area	Resumo por edificações de todas as áreas por tipologia e apresenta ainda os eco indicadores.
_ClimaticData	Dados do arquivo .cli, nada foi calculado.
_CM	Índices MRT e de conforto ITS e COMfa
_DL	Iluminância do edifício em lux devido à janela. Perto de 1,5 metros e longe de cerca de 4,5 metros.
_ET	Resultados da evapotranspiração. Representa a água a ser fornecida à área verde.
_HC	Coefficientes de transferência de calor convectivo para as superfícies.
_Inertia	Inércia térmica, calculado durante a pré-simulação.
_LW	Equilíbrio de ondas longas (infravermelho) das superfícies em W/m ² .
_SW	Irradiância de ondas curtas da superfície em W/m ² .
_SWv	Iluminância das superfícies em lx.
_TH	Contêm todos os resultados sobre o Distric Energy Center.
_TS	Temperatura da superfície exterior dada em Celsius. Ke é o coeficiente total de transferência de calor convectivo em W/m ² .K que representa a soma dos coeficientes para as paredes de uma zona.
_VF	Fator de visão do céu e o fator de visão do solo das superfícies
_YearlyResults	Resultados anuais sobre a cena.
_YearlyResultsPerBuilding	Resultados anuais resumidos sobre a cena com base a construção.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados do estudo, assim como a discussão que visa relacionar os resultados com alguns dos conceitos desenvolvidos na revisão da literatura. A simulação do compartimento térmico energético do quarteirão foi concluída e para a análise do potencial do *software CitySim* foi escolhido trabalhar somente com o arquivo _TS, que apresenta os resultados das temperaturas das superfícies ao longo do período de simulação. Desta forma, foram inicialmente analisadas as temperaturas das fachadas no modelo atual e, numa segunda fase, comparadas com outras duas situações. Além disso, as temperaturas superficiais foram utilizadas para avaliar o risco de ocorrências do fenômeno de condensação superficial. Esse fenômeno representa uma preocupação significativa no contexto do património histórico, pois as edificações antigas estão suscetíveis a diversos efeitos adversos decorrentes da condensação. A umidade resultante dessas consequências pode promover o crescimento de fungos, desencadeando processos de manipulação material que comprometem a integridade estrutural e estética dos edifícios históricos.

4.1 Avaliação da situação atual

Utilizando o arquivo _TS dos resultados em texto, avaliou-se o risco de condensação superficial nas fachadas dos edifícios. Para obter esse resultado, inicialmente foi aberto o arquivo texto _TS e copiaram-se os dados para uma planilha *Excel*, para efetuar os cálculos

com maior facilidade (Figura 35). Os dados são organizados separadamente por superfície, sendo necessário identificar o código representativo da superfície que se pretende analisar.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
1	#0(CASAS)	0(CASAS):2	0(CASAS):0	0(CASAS):€	0(CASAS):2	0(CASAS):2	0(CASAS):€	0(CASAS):€	0(CASAS):€	0(CASAS):€	0(CASAS):€	0(CASAS):€	0(CASAS):€	0(CASAS):€	0(CASAS):€	0(CASAS):€	0(CASAS):€	0(CASAS):€	0(CASAS):€	0(CASAS):€	0(CASAS):€	0(CASAS):€	0(CASAS):€
2	6.52654	8.62475	8.62951	8.21163	7.99585	8.95529	7.99845	7.84943	9.01637	8.59306	7.7848	7.95182	8.99996	8.01459	7.85111	8.05637	7.99924	8.57129	8.24079	7.87882	8.24038	7.74453	8.5888
3	6.9927	9.05667	8.88195	9.17044	9.43868	9.10958	9.48454	9.52172	9.08967	8.98683	9.40023	9.40532	8.99781	9.39846	9.44879	9.24923	9.37327	9.03023	9.57115	9.33577	9.37444	9.6609	9.22815
4	7.26546	9.10692	8.95308	9.23939	9.4391	9.00692	9.43561	9.5262	8.94851	9.03242	9.45207	9.45105	8.95878	9.37869	9.6423	9.58431	9.39195	9.11511	9.63172	9.36018	9.22962	9.81546	9.27302
5	8.08511	9.06314	8.93704	9.21831	9.38807	8.98455	9.4173	9.49946	8.92475	9.00314	9.4084	9.40818	8.93733	9.36119	9.60605	9.54692	9.35592	9.12165	9.57032	9.32383	9.19312	9.75278	9.22472
6	6.30266	9.01505	8.89638	9.17052	9.32607	8.94031	9.34832	9.42761	8.88383	8.96536	9.34831	9.3416	8.89634	9.29315	9.52918	9.47002	9.30219	9.06253	9.50289	9.26832	9.14606	9.68232	9.1694
7	5.84416	8.96354	8.83258	9.09814	9.25292	8.88382	9.25849	9.33433	8.82992	8.90851	9.27105	9.26202	8.84132	9.20553	9.42963	9.37165	9.22659	8.98153	9.41707	9.19425	9.08201	9.59258	9.109
8	6.81234	8.88185	8.76586	9.02327	9.16375	8.82352	9.15886	9.23573	8.77128	8.84836	9.19054	9.14202	8.7802	9.10485	9.33025	9.27132	9.14891	8.87833	9.32322	9.11744	9.01259	9.49702	9.0265
9	5.37604	9.01716	8.82355	9.09031	9.30144	8.89108	9.27291	9.38652	8.83924	8.91678	9.27854	9.30938	8.85843	9.25524	9.46987	9.40389	9.25283	8.99493	9.47795	9.2029	9.12713	9.6219	9.18956
10	5.97611	9.08333	8.94819	9.29795	9.72319	9.11932	9.81071	9.93256	9.08588	9.12687	9.85239	9.78088	9.09459	9.80595	9.91976	9.73384	9.5835	9.27279	9.83419	9.73624	9.62319	9.95622	9.54847
11	7.32091	9.80963	9.42163	9.92173	10.7828	9.4234	10.9669	11.1578	9.40888	9.7044	11.1373	10.8959	9.46961	11.0532	11.0041	10.6671	10.4809	10.1005	10.7918	10.9547	10.7216	10.9483	10.622
12	8.23758	10.1226	9.88091	10.5314	11.8773	10.0752	12.2644	12.5882	10.0641	10.4181	12.2304	11.9306	10.1402	12.4598	12.2805	11.6948	11.2792	10.747	11.7943	12.0141	11.5934	11.6888	11.6346
13	8.01495	10.6539	10.1656	10.8769	12.3349	10.1525	12.9077	13.1522	10.1434	10.6947	13.1258	12.8712	10.4901	13.0731	12.7792	12.1662	11.7003	11.2179	12.1106	12.8175	12.3078	12.3331	12.0828
14	8.27047	10.4074	10.0991	10.5981	12.205	10.3046	12.5272	12.308	10.3041	10.6947	12.7607	12.5794	10.3212	12.3763	11.9146	11.4249	11.0326	10.8698	11.4332	12.4806	11.6346	11.2677	11.7111
15	7.81702	10.5836	10.3503	10.8516	12.4024	10.4565	12.856	12.8185	10.4398	10.8203	12.6373	12.7229	10.5272	12.8503	12.2668	11.6203	11.3726	11.1118	11.8515	12.4874	11.8608	11.518	12.0118
16	8.01114	10.4861	10.2746	10.6961	11.9421	10.3792	12.2973	12.1902	10.3504	10.6841	12.2162	11.9796	10.4355	12.2248	11.8054	11.3215	11.0617	10.8553	11.4329	12.0617	11.4975	11.2785	11.5689
17	8.2467	10.4015	10.0262	10.3523	11.0691	10.3063	11.3576	11.1938	10.0793	10.3474	11.4452	11.3389	10.3176	11.2135	10.9706	10.696	10.4448	10.7928	11.3234	10.8795	10.7349	10.8414	
18	7.1018	10.1618	9.96442	10.2082	10.5917	9.97759	10.6284	10.6037	9.93383	10.2133	10.6511	10.6444	9.95727	10.5372	10.5294	10.3774	10.3402	10.0901	10.5067	10.5959	10.4421	10.5373	10.3525
19	7.05534	9.79483	8.81319	10.0406	10.0701	9.90301	10.1694	10.2397	9.83474	9.95862	10.1135	10.053	9.84774	10.1385	10.3024	10.2699	10.1377	10.0298	10.2781	10.0729	10.0317	10.45	9.95122
20	7.84904	9.749	9.83107	10.0307	10.0044	9.80638	10.1018	10.1014	9.76073	9.79029	10.1051	10.0001	9.78372	9.96706	10.1871	10.1318	10.1245	9.79643	10.2092	10.0559	9.94065	10.3802	9.87006
21	7.50683	9.68409	9.62446	9.86226	9.94733	9.75745	9.95073	10.0326	9.72139	9.78385	9.96573	9.93332	9.72346	9.90206	10.1115	10.0483	9.98133	9.76494	10.1404	9.90538	9.89211	10.2853	9.81451
22	8.02819	9.61461	9.55132	9.7877	9.86659	9.67516	9.86639	9.94862	9.63877	9.69413	9.88869	9.85483	9.64214	9.8203	10.0264	9.97371	9.90493	9.65395	10.0545	9.82916	9.80114	10.1697	9.73961
23	6.4953	9.5346	9.4999	9.72551	9.79753	9.55162	9.8074	9.88293	9.50836	9.57995	9.82826	9.78582	9.50988	9.76376	9.95257	9.90421	9.84011	9.6129	9.98824	9.77176	9.69917	10.1239	9.66595
24	5.35538	9.48541	9.41251	9.6523	9.72338	9.47682	9.72797	9.8098	9.40678	9.4734	9.75798	9.71815	9.44212	9.67969	9.88627	9.82482	9.76869	9.51155	9.89233	9.70124	9.61184	10.0661	9.603
25	5.75942	9.38088	9.33949	9.57225	9.64521	9.38474	9.64361	9.72061	9.34285	9.394	9.68101	9.63831	9.3499	9.59774	9.79386	9.73461	9.68795	9.42784	9.80162	9.62466	9.53138	9.93579	9.51104
26	6.78085	9.25465	9.23265	9.45691	9.49099	9.26255	9.50702	9.57835	9.21656	9.28187	9.56045	9.48021	9.22615	9.46238	9.64597	9.58845	9.56689	9.30539	9.65321	9.50821	9.41576	9.84427	9.37333
27	7.18097	9.0449	9.11404	9.33077	9.23787	9.03984	9.36835	9.43476	9.07281	9.13211	9.42245	9.35223	9.01294	9.32252	9.49901	9.44155	9.43412	9.16159	9.36825	9.37535	9.25442	9.63688	9.142
28	6.77498	8.97145	8.95506	9.15327	9.18604	8.83753	9.15297	9.21454	8.79775	8.82916	9.26814	9.20103	8.81134	9.11744	9.26345	9.21605	9.25688	8.94046	9.32714	9.21823	9.8243	9.17671	9.07709
29	8.37496	8.62935	8.75213	8.92968	8.80117	8.81493	9.12735	9.18905	8.77659	8.82171	9.04782	8.83867	8.78653	9.0865	9.22816	9.18244	9.03916	8.91105	8.89729	9.0327	8.93873	9.26636	8.70924

Figura 35 – Amostra dos dados _TS no ficheiro do Excel.

Foram escolhidas 6 paredes distintas, posicionadas em diferentes direções, como evidenciado na figura 36. Como o local de estudo não possui paredes na direção norte e sul, foram selecionadas nas seguintes direções: duas na direção nordeste (parede 202, parede 226), duas no noroeste (parede 260, parede 308), uma na sudeste (parede 438) e uma na sudoeste (parede 500). Os números de identificação são gerados pelo próprio software CitySim.

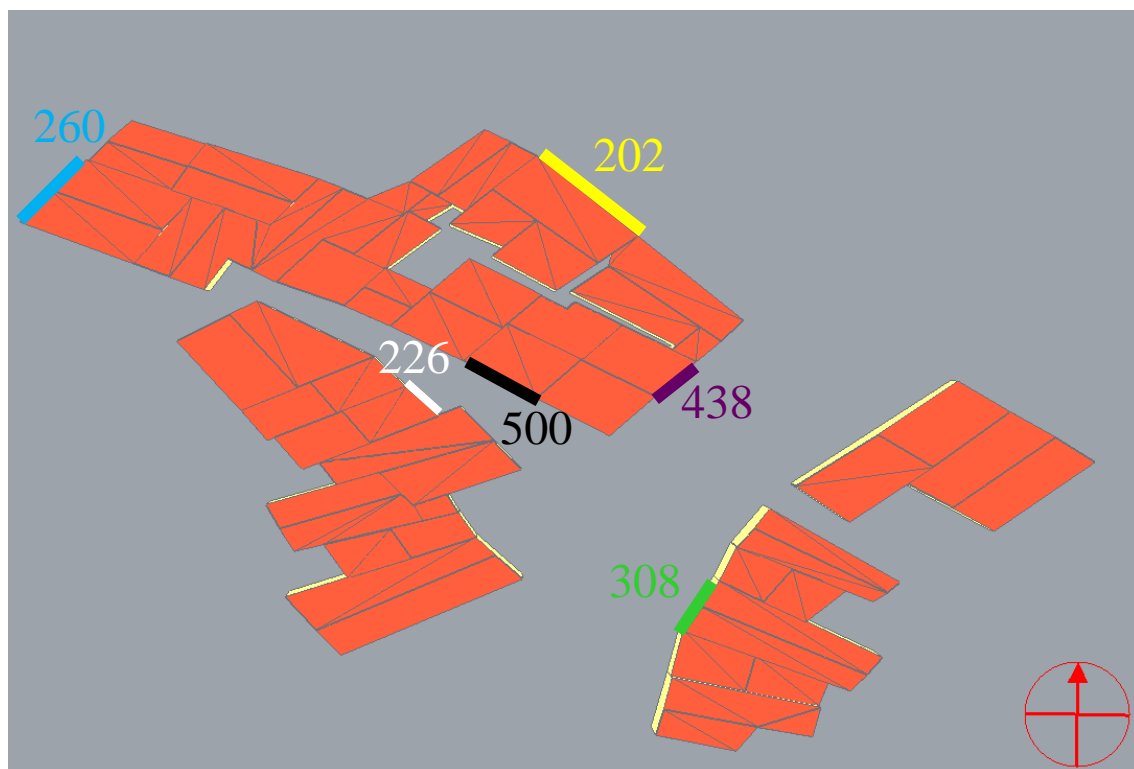


Figura 36 – Paredes selecionadas.

Após a escolha das paredes desejadas, foram excluídos do ficheiro *Excel* os demais dados, para simplificar os processos e sobrando assim somente os dados das paredes desejadas. Para completar o ficheiro, foram copiados para os dados horários da umidade relativa e da temperatura do ar, que estavam no arquivo climático (Figura 37), mas que são necessários para o cálculo da temperatura de ponto de orvalho.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	h	m	Ta	RH		202		226		260		308		438		500
2	1	1	10.8	94		7.65475		8.54579		8.15366		8.38286		7.98256		8.45598
3	2	1	10.5	94		9.55616		8.92513		9.57426		9.45534		9.51178		9.2417
4	3	1	10.3	95		9.47805		8.99305		9.53389		9.3799		9.38911		9.21595
5	4	1	10.1	96		9.43403		8.97884		9.47556		9.32039		9.34357		9.22398
6	5	1	9.9	97		9.37614		8.94089		9.41116		9.26445		9.28908		9.16303
7	6	1	9.6	98		9.29973		8.87412		9.33335		9.20051		9.21945		9.08023
8	7	1	9.4	99		9.22169		8.80875		9.24321		9.12076		9.1454		8.97776
9	8	1	9.7	98		9.30632		8.8507		9.37951		9.25667		9.24047		9.07306
10	9	1	9.9	97		9.98054		9.06663		9.97043		9.72305		9.76821		9.26412
11	10	1	10.5	95		11.448		9.61788		11.2332		10.8226		10.9314		9.92985
12	11	1	11	93		12.6711		10.2265		12.6875		11.9635		11.8163		10.3404
13	12	1	11.4	91		13.6139		10.5722		13.1305		12.4418		12.6837		10.7477
14	13	1	11.1	92		13.1441		10.5381		13.098		12.2877		12.0826		10.5813
15	14	1	11.1	92		13.2555		10.6893		13.3045		12.5136		12.2194		10.7445
16	15	1	11	92		12.6375		10.5755		12.667		12.023		11.8583		10.6049
17	16	1	10.8	93		11.6961		10.2697		11.3905		11.0997		11.2345		10.3705
18	17	1	10.7	93		10.768		10.0685		10.7704		10.5503		10.6144		10.111
19	18	1	10.5	93		10.1399		9.84411		10.1235		10.0416		10.1398		10.0994
20	19	1	10.4	93		10.1152		9.83619		10.0621		9.94693		10.0387		9.90116
21	20	1	10.2	93		10.0009		9.66101		10.0058		9.9004		9.98626		9.85998
22	21	1	10	92		9.9217		9.58776		9.92531		9.85516		9.89024		9.74655
23	22	1	9.9	92		9.859		9.52732		9.85879		9.75088		9.80505		9.70072
24	23	1	9.7	92		9.79169		9.44693		9.78108		9.68153		9.72563		9.60835
25	24	1	9.5	91		9.71246		9.37173		9.69238		9.59239		9.64537		9.52379
26	1	1	9.1	93		9.59887		9.26524		9.55103		9.45828		9.52747		9.39594
27	2	1	8.7	94		9.45693		9.13888		9.28546		9.21146		9.35515		9.24875
28	3	1	8.4	95		9.26308		8.97829		9.23643		9.14095		8.99328		9.02574
29	4	1	8	96		8.98146		8.71474		8.83895		8.76056		9.03298		9.00219

Figura 37 – Amostra dos dados das fachadas e dos dados climáticos no ficheiro do *Excel*.

Para estimar o valor da temperatura de ponto de orvalho, foi utilizada a Equação 1. O valor da temperatura de ponto de orvalho foi calculado para cada hora do ano.

$$Tpo = \left(\frac{RH}{100}\right)^{\frac{1}{8}} \times (112 + (0,9 \times Ta)) + (0,1 \times Ta) - 112 \quad (1)$$

Onde:

Tpo = temperatura de ponto de orvalho (°C);

RH = Umidade relativa (%);

Ta = Temperatura do ar (°C).

Os valores horários calculados (Figura 38) foram comparados com as temperaturas superficiais das fachadas. Considerou-se como critério para a avaliação do risco de ocorrência de condensação superficial que a temperatura de ponto de orvalho seja maior ou igual à

temperatura superficial da parede. Essa comparação foi feita para as) 8760 (oito mil setecentos e sessenta) horas do ano e individualmente para cada parede selecionada (Figura 34). Os resultados encontram-se sintetizados na Tabela 6.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	h	m	Ta	RH	$PO=\{(RH/100)^{(1/8)}\}^{(112+(0,9*Ta))+(0,1*Ta)}-112$		202		226		260		308		438		500
2	1	1	10.8	94	9.862197091		7.65475		8.54579		8.15366		8.38286		7.98256		8.45598
3	2	1	10.5	94	9.564277331		9.55616		8.92513		9.57426		9.45534		9.51178		9.2417
4	3	1	10.3	95	9.524945124		9.47805		8.99305		9.53389		9.3799		9.38911		9.21595
5	4	1	10.1	96	9.483681881		9.43403		8.97884		9.47556		9.32039		9.34357		9.22398
6	5	1	9.9	97	9.440522416		9.37614		8.94089		9.41116		9.26445		9.28908		9.16303
7	6	1	9.6	98	9.295727531		9.29973		8.87412		9.33335		9.20051		9.21945		9.08023
8	7	1	9.4	99	9.248762087		9.22169		8.80875		9.24321		9.12076		9.1454		8.97776
9	8	1	9.7	98	9.395500537		9.30632		8.8507		9.37951		9.25667		9.24047		9.07306
10	9	1	9.9	97	9.440522416		9.98054		9.06663		9.97043		9.72305		9.76821		9.26412
11	10	1	10.5	95	9.723794717		11.448		9.61788		11.2332		10.8226		10.9314		9.92985
12	11	1	11	93	9.89920446		12.6711		10.2265		12.6875		11.9635		11.8163		10.3404
13	12	1	11.4	91	9.967159396		13.6139		10.5722		13.1305		12.4418		12.6837		10.7477
14	13	1	11.1	92	9.835137782		13.1441		10.5381		13.098		12.2877		12.0826		10.5813
15	14	1	11.1	92	9.835137782		13.2555		10.6893		13.3045		12.5136		12.2194		10.7445
16	15	1	11	92	9.736070953		12.6375		10.5755		12.667		12.023		11.8583		10.6049
17	16	1	10.8	93	9.700829917		11.6961		10.2697		11.3905		11.0997		11.2345		10.3705
18	17	1	10.7	93	9.601642645		10.768		10.0685		10.7704		10.5503		10.6144		10.111
19	18	1	10.5	93	9.403268102		10.1399		9.84411		10.1235		10.0416		10.1398		10.0994
20	19	1	10.4	93	9.304080831		10.1152		9.83619		10.0621		9.94693		10.0387		9.90116
21	20	1	10.2	93	9.105706288		10.0009		9.66101		10.0058		9.9004		9.98626		9.85998
22	21	1	10	92	8.745402669		9.9217		9.58776		9.92531		9.85516		9.89024		9.74655
23	22	1	9.9	92	8.64633584		9.859		9.52732		9.85879		9.75088		9.80505		9.70072
24	23	1	9.7	92	8.448202184		9.79169		9.44693		9.78108		9.68153		9.72563		9.60835
25	24	1	9.5	91	8.087199944		9.71246		9.37173		9.69238		9.59239		9.64537		9.52379
26	1	1	9.1	93	8.014646301		9.59887		9.26524		9.55103		9.45828		9.52747		9.39594
27	2	1	8.7	94	7.776758769		9.45693		9.13888		9.28546		9.21146		9.35515		9.24875
28	3	1	8.4	95	7.635873992		9.26308		8.97829		9.23643		9.14095		8.99328		9.02574
29	4	1	8	96	7.393301513		8.98146		8.71474		8.83895		8.76056		9.03298		9.00219

Figura 38 – Amostra dos dados prontos no ficheiro do Excel.

Tabela 6 – Avaliação do risco de condensação na situação atual.

Número da fachada	Orientação	Total de horas condensadas / ano	% de horas condensadas
202	Nordeste	154	1,76 %
226	Nordeste	180	2,05 %
260	Noroeste	180	2,05 %
308	Noroeste	161	1,84 %
438	Sudeste	137	1,56 %
500	Sudoeste	158	1,80 %

Os resultados mostram que todas as fachadas analisadas apresentam um risco de ocorrência de condensação superficial superior a 1,5% das horas de um ano. As fachadas que apresentam maior risco são a 226 e a 260, que estão posicionadas nas direções nordeste e noroeste respectivamente, sendo, portanto, as fachadas menos propensas a receber incidência solar. No caso da primeira fachada (226), existe ainda uma grande proximidade de edifícios à sua frente que condicionam ainda mais a quantidade de radiação incidente.

Foi ainda calculada a variação entre a temperatura de ponto de orvalho e a temperatura superficial da parede, nos instantes em que existe risco de condensação superficial. Quanto maior for esta diferença, maior será a incidência da condensação. Após esse cálculo horário, os valores obtidos foram somados e em seguida divididos pelas horas do fenômeno, obtendo-se,

assim, o valor médio da diferença dos graus. A Tabela 7 mostra os resultados obtidos nas seis paredes, sendo que após a análise é possível verificar que a média de graus em todas as paredes analisadas foi muito semelhante e sempre superior a 0,6°C. Somente a fachada 226 apresenta uma média superior, 0,726°C, sendo que essa possui orientação nordeste e apresenta proximidades com demais edifícios.

Tabela 7 – Gravidade das condensações.

Número da fachada	Orientação	Média da diferença dos graus (°C)
202	Nordeste	0,658
226	Nordeste	0,726
260	Noroeste	0,632
308	Noroeste	0,658
438	Sudeste	0,639
500	Sudoeste	0,683

Outro ponto analisado foi o número de horas do ano consecutivas em que a fachada apresenta risco de ocorrência de condensação. O resultado dessa avaliação está representado nos gráficos de dispersão, (Figura 39 até 44), determinado pelo número de horas de condensação *versus* as horas do ano. Neste tipo de gráfico é possível identificar visualmente todas as horas de risco de ocorrência de condensação e a frequência dessas horas, cada círculo representa uma hora. Entretanto, devido aos valores presentes no eixo das abscissas serem muitos, os resultados acabam se agrupando um sobre os outros, dificultando a visualização, além disso é difícil identificar em qual período do ano ocorrem os fenômenos.

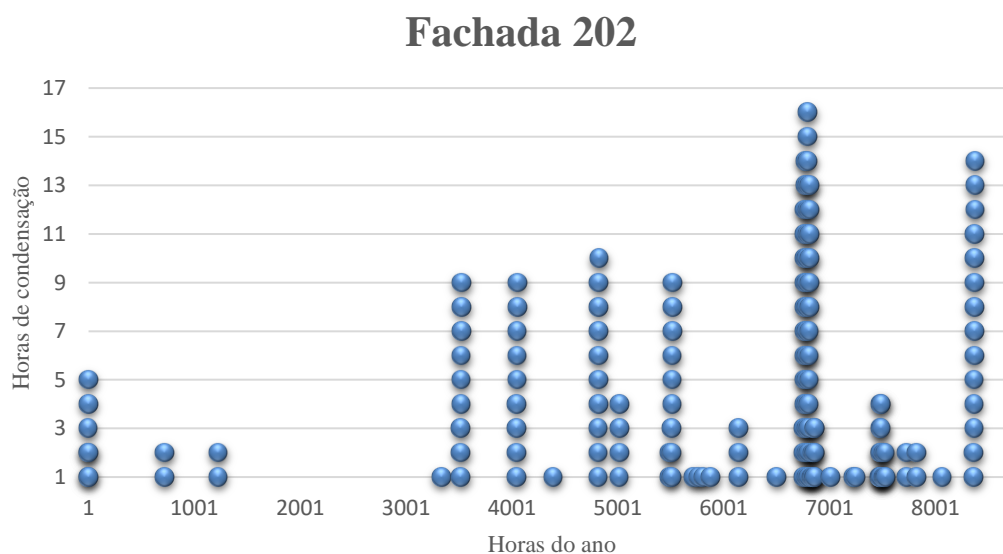


Figura 39 – Horas do ano *versus* horas de condensação da fachada 202.

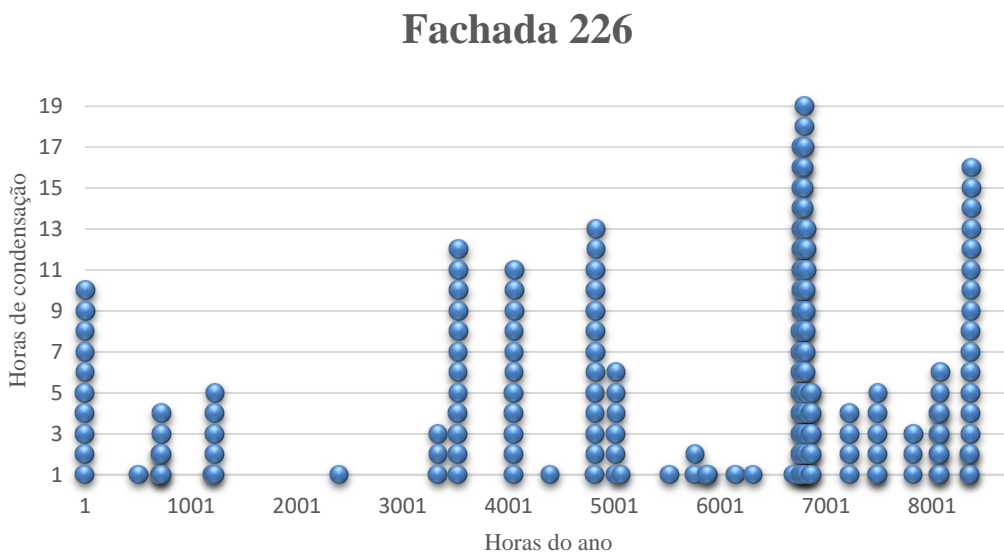


Figura 40 – Horas do ano *versus* horas de condensação da fachada 226.

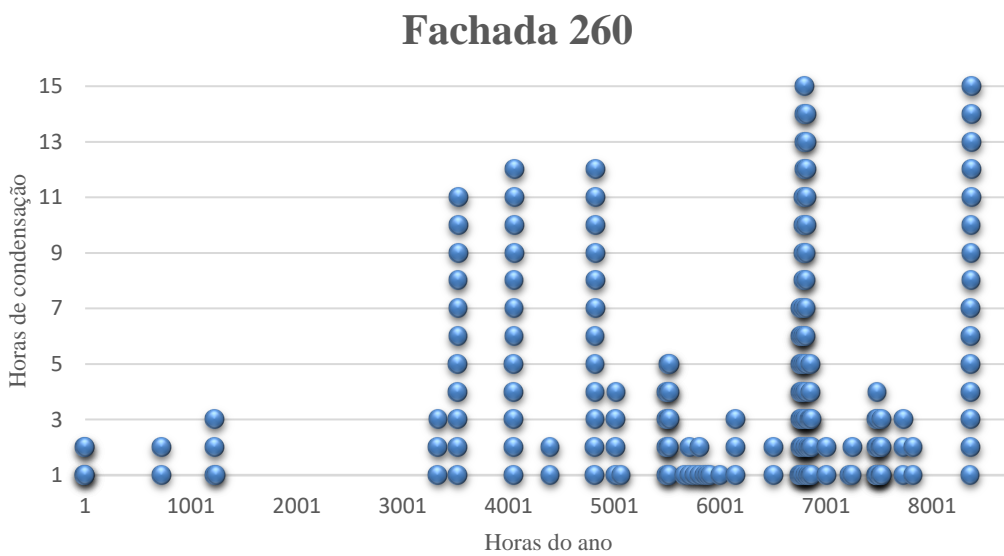


Figura 41 – Horas do ano *versus* horas de condensação da fachada 260.

Fachada 308

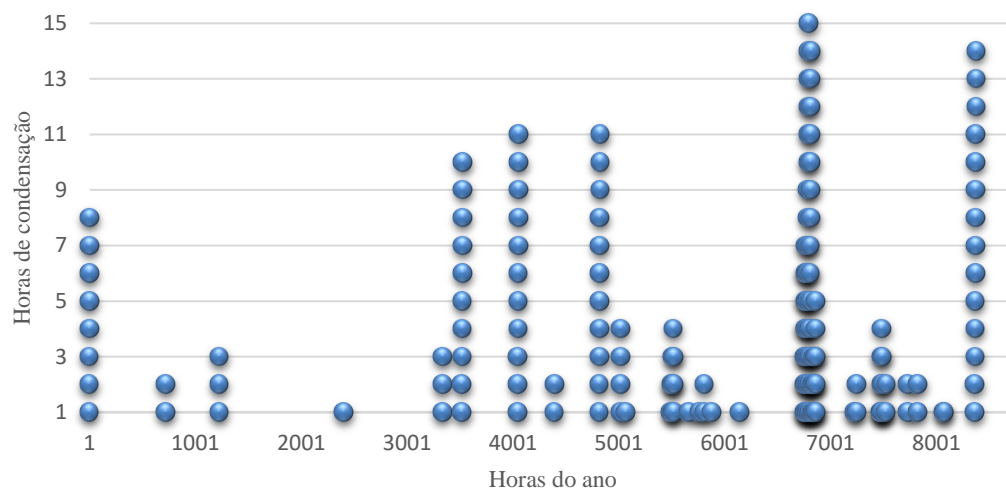


Figura 42 – Horas do ano *versus* horas de condensação da fachada 308.

Fachada 438

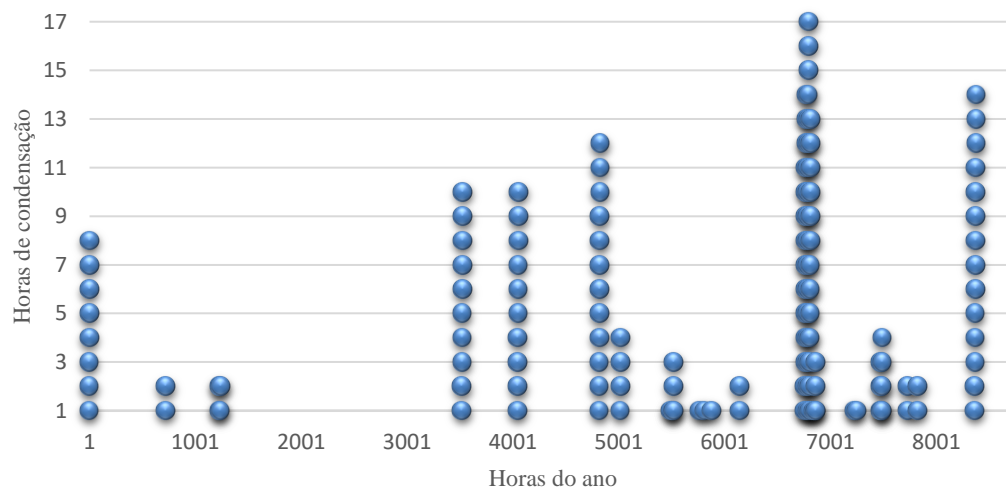


Figura 43 – Horas do ano *versus* horas de condensação da fachada 438.

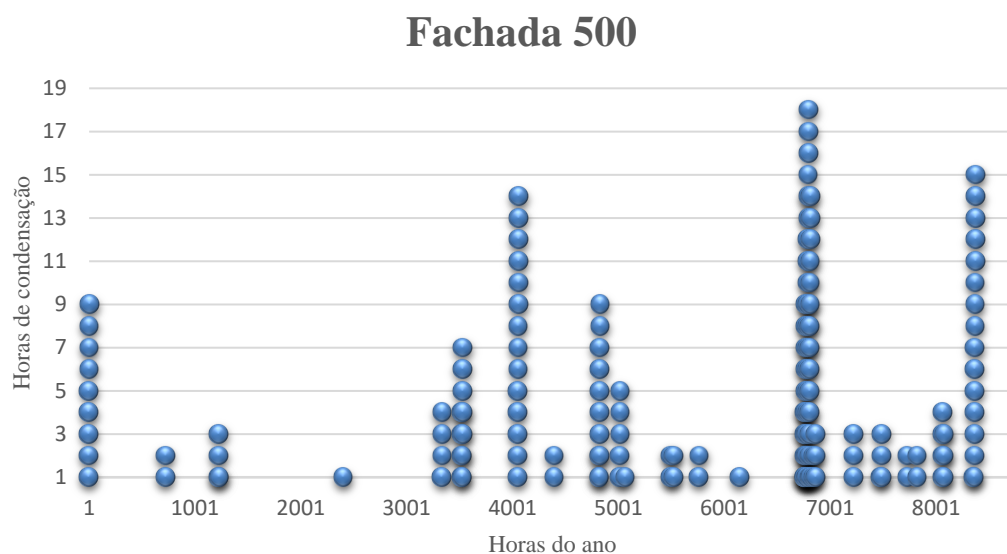
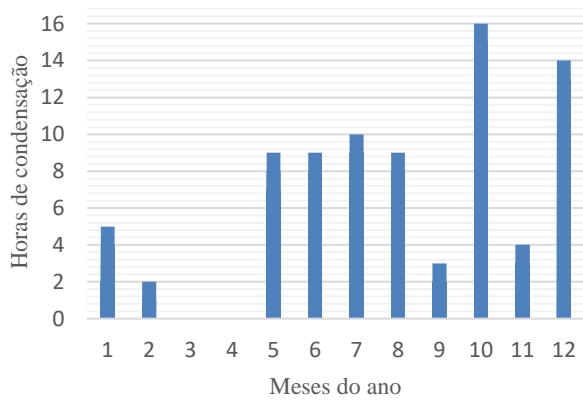


Figura 44 – Horas do ano *versus* horas de condensação da fachada 500.

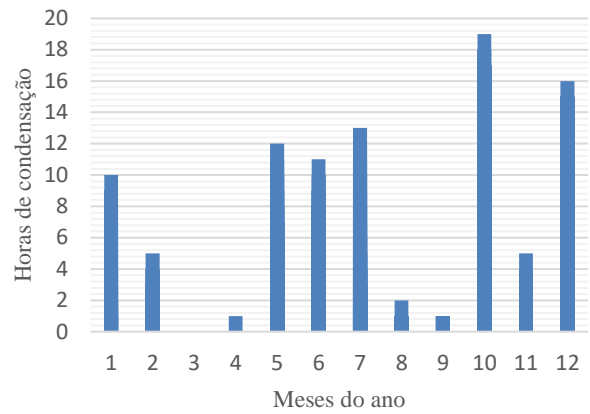
Analisando os gráficos foi possível observar que a maior frequência de horas com risco de ocorrência de condensação ocorre depois da hora 3001 do ano, ou seja, a partir do mês de junho. Além disso, na proximidade da hora 7001 do ano, mês de outubro, ocorre em todas as fachadas analisadas dois fenômenos: o primeiro é a concentração das horas com risco de ocorrência de condensação e o segundo é o maior pico de horas consecutivas.

Devido à dificuldade de se perceber o risco de ocorrência de condensação durante a período do ano, foi realizado um segundo tipo de gráfico para todas as fachadas, sendo esse de coluna, dado pelo número de horas de condensação *versus* o mês do ano (Figura 45). Esse tipo de gráfico apresenta menos dados, não sendo possível analisar com detalhes todas as horas de condensação, porém apresenta da forma clara a maior sequência de horas com risco de ocorrência de condensação no mês durante o ano, sendo possível realizar a comparação mensal.

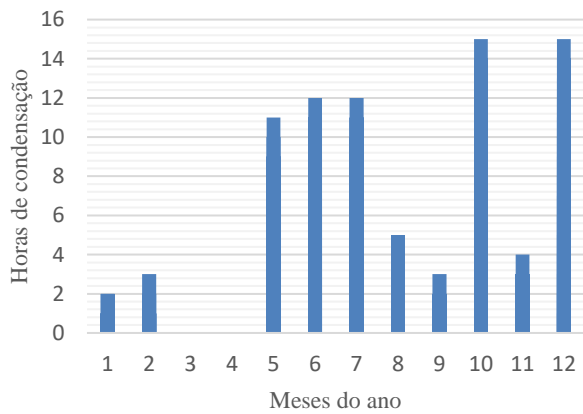
Fachada 202



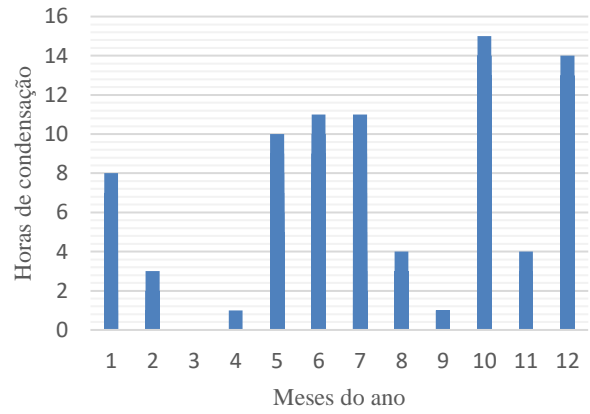
Fachada 226



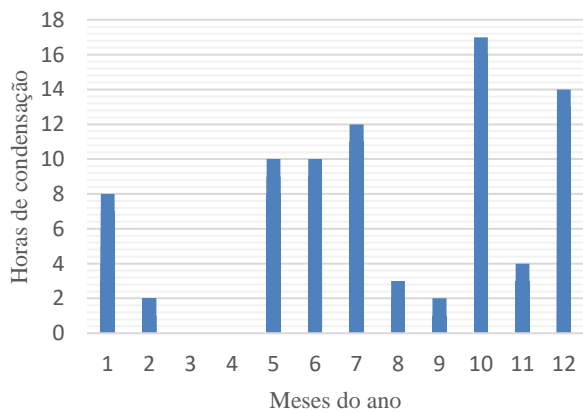
Fachada 260



Fachada 308



Fachada 438



Fachada 500

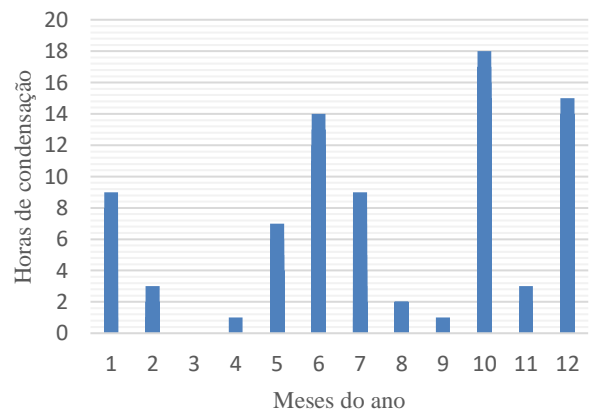


Figura 45 – Meses do ano *versus* horas de condensação das fachadas.

Observando os gráficos da figura 45, o mês de março (3) é o único que não apresenta risco de ocorrência de condensação para nenhuma das fachadas analisadas, este mês corresponde ao final do inverno na região e o início da primavera. Na sequência os meses de abril (4) e de setembro (9), são os com menores sequências de horas com risco de ocorrência de condensação, sendo primavera e verão respectivamente. Em contrapartida os meses que apresentam as maiores sequências de horas com risco de ocorrência de condensação, são outubro (10) e dezembro (12), que representam o início da queda das temperaturas, outono, e o início do inverno. Entretanto, é preciso ressaltar que os gráficos, demonstram apenas a maior sequência de horas de risco de ocorrência de condensação, ou seja, não significa que exista maior ocorrência, apenas que a sequência de horas é maior

Os resultados dos meses frios foram esperados, visto que apresentam uma maior quantidade de horas com risco de ocorrência de condensação consecutivas, entretanto, os resultados para os meses de verão surpreenderam por também apresentarem muitas horas com risco de ocorrência de condensação. Analisando a planilha com todos os dados gerados foi possível identificar que as horas com risco de condensação, principalmente nos meses de junho (6) e julho (7), ocorrem no período noturno até o início da manhã, mais especificamente entre as 22h e às 5h, período que não possui incidência solar.

Na sequência foi realizada a avaliação da frequência das horas de condensação, ou seja, foi analisado quantas vezes ocorre horas de condensação (uma, duas, três e assim por diante). Na sequência (Figuras 46 a 48) são apresentados o gráfico da frequência para algumas das fachadas.

Frequência fachada 226

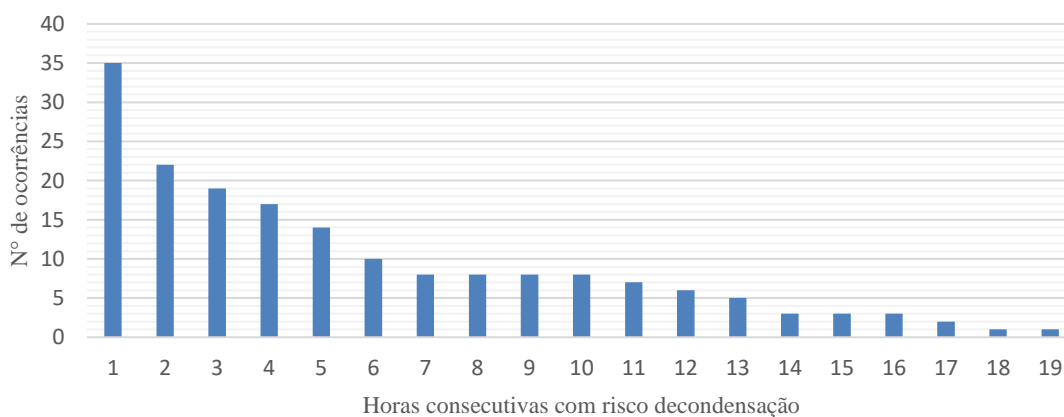


Figura 46 – Frequência de horas consecutivas com risco de ocorrência de condensação da fachada 226.

Frequência fachada 260

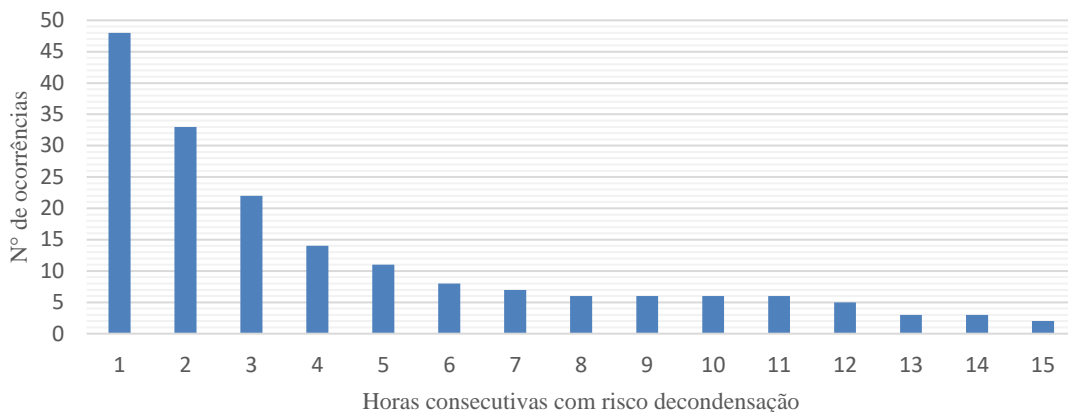


Figura 47 – Frequência de horas consecutivas com risco de ocorrência de condensação da fachada 260.

Frequência fachada 438

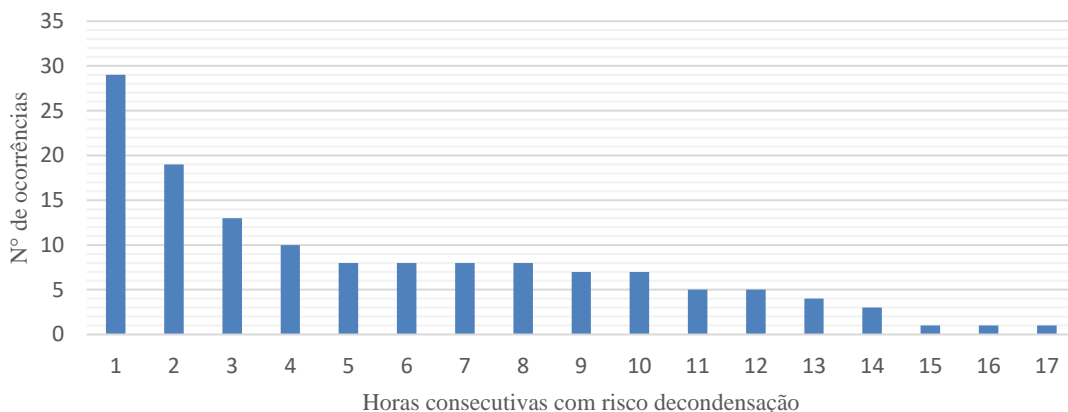


Figura 48 – Frequência de horas consecutivas com risco de ocorrência de condensação da 438.

A fachada 226 (Figura 46), apresentou a maior sequência de horas consecutivas com risco de ocorrência de condensação entre todas as fachadas, sendo o período máximo de 19 horas. Essa fachada conforme Tabela 6, é a que apresenta maior porcentagem de horas com risco de condensação, juntamente com a fachada 260, e a maior diferença média de temperaturas.

Já a fachada 260 (Figura 47), apresenta a maior frequência de ocorrência das três primeiras horas entre todas as fachadas analisadas, porém a frequência brusca após a terceira hora. Em contrapartida a fachada 438 (Figura 48), é a que apresenta a menor frequência de ocorrências das primeiras horas, mas se mantém estável com o aumento das horas, diminuindo de forma lenta.

Tendo como base a percentagem de horas com risco de ocorrência de condensação da Tabela 6 e a média da diferença de graus da Tabela 7, apresentadas anteriormente, foi comparada a frequência da ocorrência de condensação das fachadas 260, que apresenta a maior percentagem de horas e a menor diferença de graus, com a fachada 438, que apresentou a menor percentagem de horas e a segunda maior diferença de graus. Nessa comparação (Figura 49), é possível perceber que mesmo que a fachada 438 seja a de menor percentagem em horas totais/ano, a mesma apresenta uma maior sequência de horas de condensação em comparação a fachada 260. Além disso, é possível notar a diferença de frequência das duas fachadas entre as 3 primeiras horas

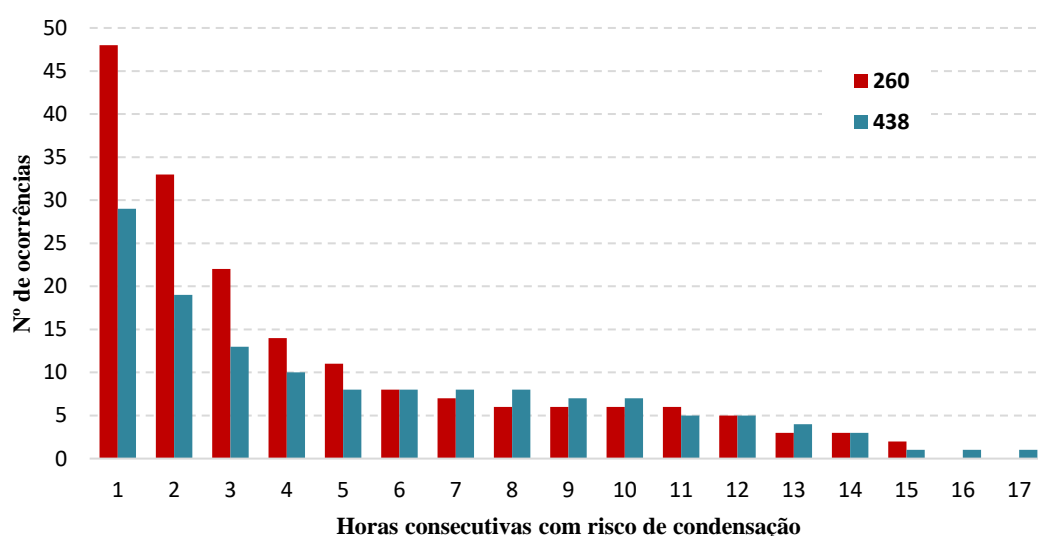


Figura 49 – Ocorrência de risco de condensação nas fachadas 260 e 438.

4.2 Impacto da introdução de isolante térmico

Visto que o caso de estudo se trata de um local histórico, os cuidados com a preservação do seu valor patrimonial implicam que não se introduzam alterações arquitetônicas nas fachadas externas, ou seja, toda alteração deve ser realizada na fachada interna das edificações. Assim, no âmbito da avaliação do potencial do programa, analisou-se o impacto de introduzir um isolamento térmico pelo interior das paredes dos edifícios. Para tal, foi realizada uma segunda simulação, adicionando-se uma camada de EPS (Poliestireno Expandido) na constituição da parede. Foi escolhido o EPS, pois é o isolante térmico mais utilizado em Portugal.

O material foi adicionado na sequência da argamassa interna e foi considerado com uma espessura de 0,04 m, uma densidade de 18 kg/m³, uma condutibilidade térmica de 0,04 W/mK

e um calor específico de 1550 J/(kg.K). Além disso, foi adicionado uma nova argamassa interna igual às já consideradas, com 0,025 m de espessura, com condutibilidade térmica de 0,80 W/mK, 1600 kg/m³ de densidade e 1046 J/(kg.K) de calor específico (Figura 50). Os valores das propriedades dos materiais foram retiradas de LNEC (2006) e Mendonça (2005).

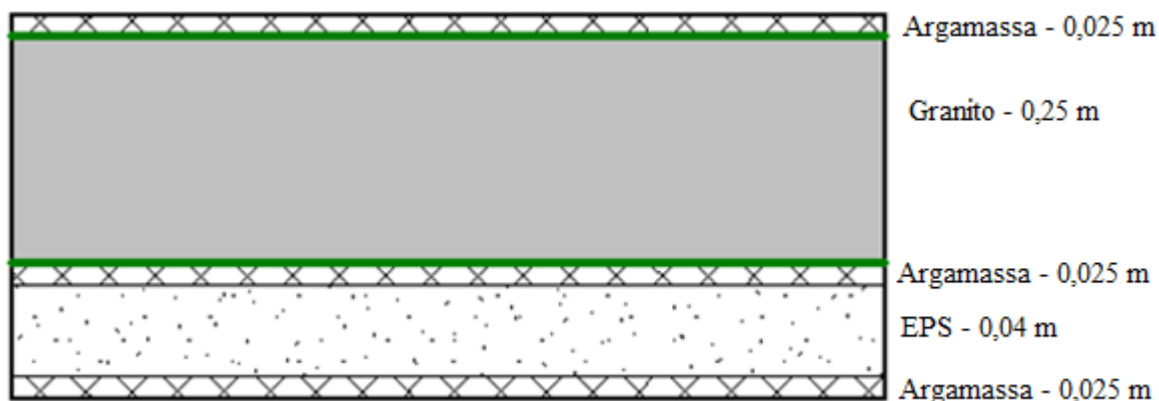


Figura 50 – Componente construtivo da parede com EPS.

Após a alteração da composição das paredes exteriores, o quarto foi simulado novamente. Com a simulação realizada, foram selecionadas as temperaturas das paredes estudadas no arquivo _TS e os dados foram copiados para outro ficheiro *Excel*. Neste ficheiro foram novamente contabilizadas as horas condensadas e a percentagem que essas horas representam no total das 8760 (oito mil setecentas e sessenta) horas do ano. Os resultados obtidos estão na Tabela 8.

Tabela 8 – Avaliação do risco de condensação na situação com o EPS.

Número da fachada	Orientação	Total de horas condensadas / ano	% de horas condensadas
202	Nordeste	1257	14,35 %
226	Nordeste	1385	15,81 %
260	Noroeste	1282	14,63 %
308	Noroeste	1194	13,63 %
438	Sudeste	1195	13,64 %
500	Sudoeste	1343	15,33 %

Comparando estes resultados com os da Tabela 6, é possível notar o aumento da percentagem de horas com risco de condensação nas fachadas com EPS e consequentemente o total de horas de condensação. O aumento médio foi de 1114 horas. Este resultado já era esperado, visto que com a introdução do EPS, se reduz o fluxo de calor do interior para o exterior e, consequentemente, a temperatura superficial exterior diminui. A título de exemplo,

a Figura 59 mostra a comparação da temperatura superficial das fachadas 202 e 226 com e sem a utilização do EPS.

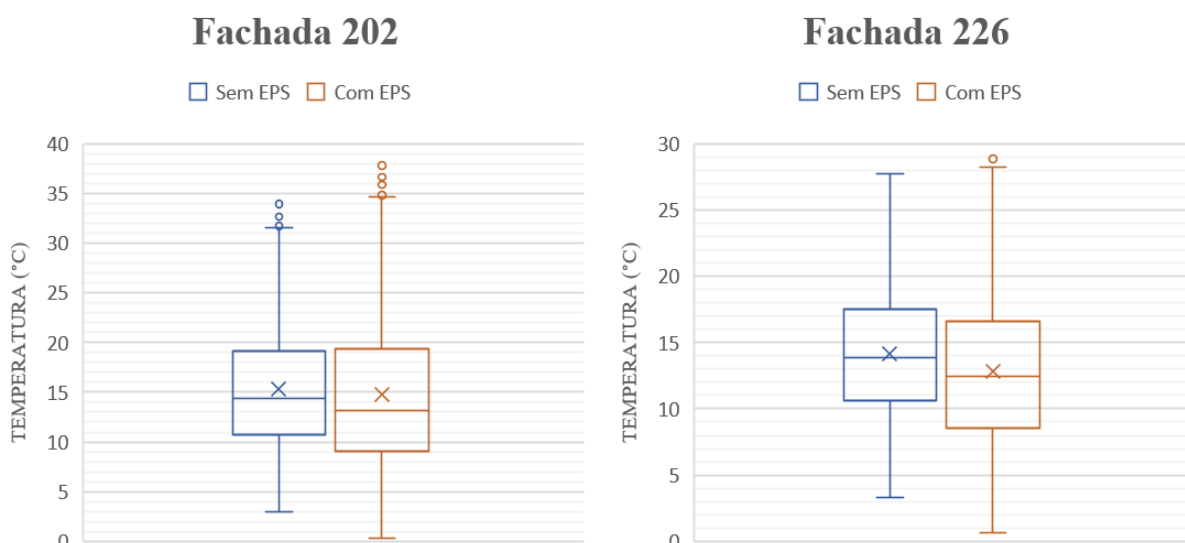


Figura 51 – Comparação das temperaturas superficiais com e sem EPS das fachadas 202 e 226.

Com esta representação, as diferenças de temperatura entre as fachadas analisadas, com e sem EPS, são pequenas, variando poucos graus. Assim, foi realizado o cálculo da diferença média de temperatura entre a fachada com e sem EPS ao longo do ano. Os resultados obtidos estão sintetizados na Tabela 9.

Tabela 9 – Diferenças médias na temperatura superficial com e sem o EPS.

Número da fachada	Diferença média de temperatura da fachada com e sem EPS / ano
202	0,57 °C
226	1,33 °C
260	0,37 °C
308	0,61 °C
438	0,81 °C
500	1,35 °C

Os resultados mostram que as fachadas mais afetadas pelo uso do EPS foram a 226 e a 500, que se encontram mais próximas entre si. Já a que menos sofreu alteração foi a 260, que possui a orientação noroeste e não possui proximidade com outras fachadas.

Com essa informação foram desenvolvidos os gráficos de frequência da faixa de variação de temperatura dessas três fachadas em questão: a cor vermelha destaca a frequência das variações negativas, ou seja, quando a temperatura da fachada com EPS é maior que a fachada atual; já a cor azul, destaca a faixa das variações positivas, quando a temperatura da fachada

com EPS é menor que a fachada atual; e, por fim, a cor verde destaca uma faixa que envolve variação negativa e positiva (Figuras 52 a 54).

Frequência da variação da temperatura fachada 226

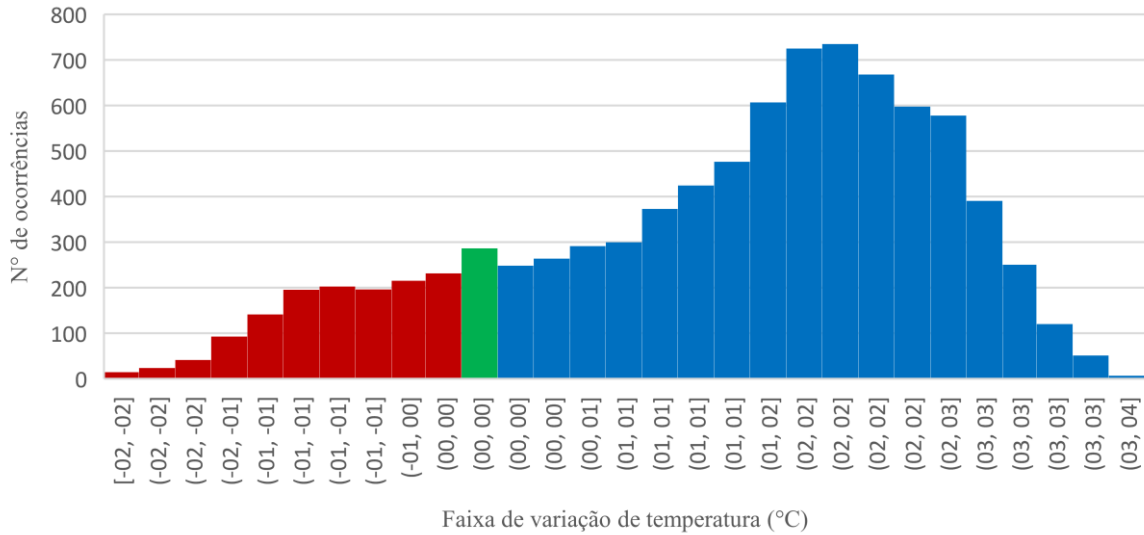


Figura 52 – Frequência da variação da temperatura fachada 226.

Frequência da variação da temperatura fachada 260

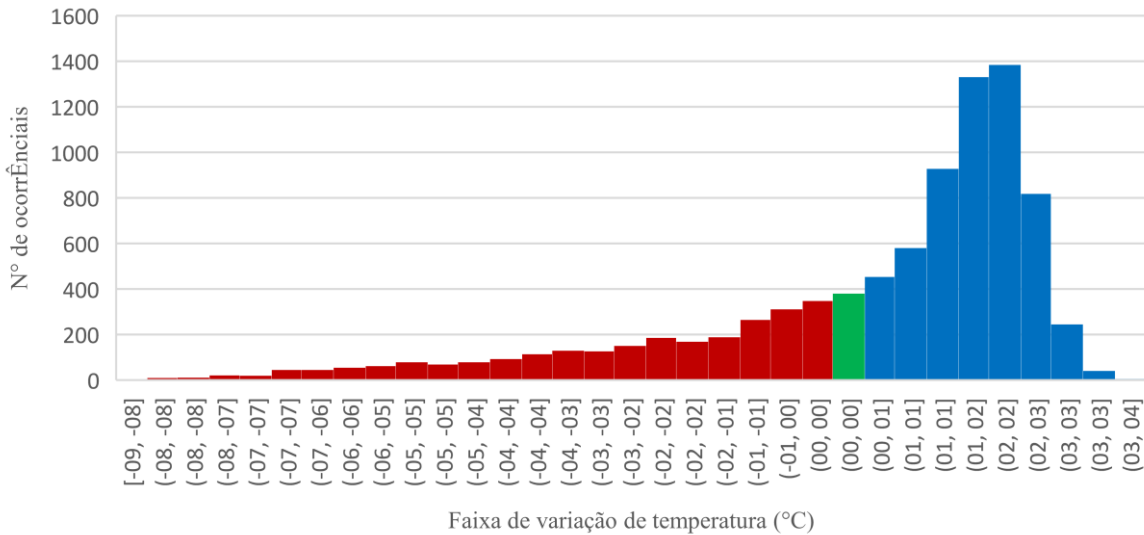


Figura 53 – Frequência da variação da temperatura fachada 260.

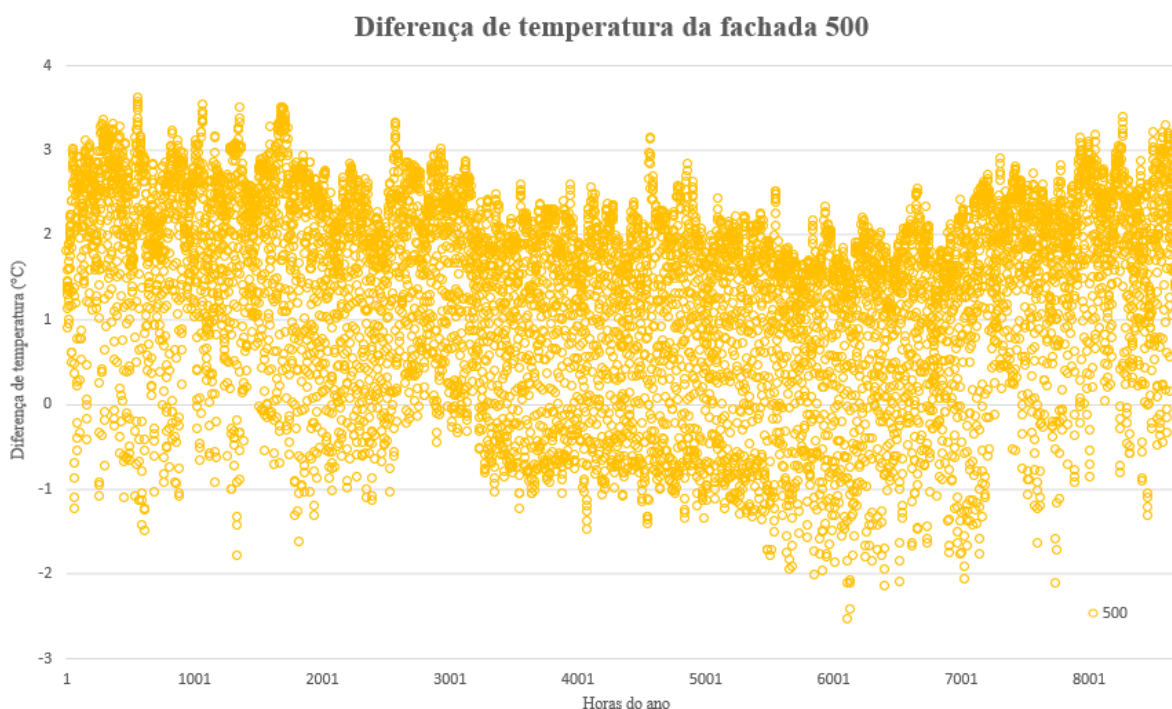


Figura 55 – Diferença de temperatura da fachada 500.

Analisando o gráfico, a fachada apresenta variações de temperaturas que vão de 4°C até -3°C, apresentando diferenças positivas superiores as negativas, além disso ocorre uma concentração das diferenças entre 1 e 3 °C.

4.3 Impacto de um cenário climático futuro

Devido ao aumento das temperaturas observado nos últimos anos, reflexo do aquecimento global, cada vez mais estudos são realizados para tentar prever os possíveis efeitos deste fenômeno. Entre esses estudos, encontra-se uma pesquisa publicada na revista *Climate Dynamics* realizada por investigadores portugueses, que relatam o possível clima de Portugal e Espanha para dois períodos futuros, o primeiro de 2046 a 2065 e o segundo de 2081 a 2100. Para o primeiro cenário, o aumento das temperaturas poderá variar de 1,5 a 2 °C, já para o segundo período o aumento esperado é de 2 a 3 °C. Além disso é destacado, que para algumas regiões de Portugal o aumento nas máximas diárias poderá chegar a 5°C (Carvalho, Cardoso & Rocha, 2021).

Com base nesta informação, foi realizada uma nova simulação para entender como o aumento das temperaturas impactará nas temperaturas da fachada. Para tanto, inicialmente, foi necessário alterar o arquivo climático, neste caso foi selecionada a coluna correspondente à

temperatura do ar e aumentou-se de 2°C, que corresponde à maior temperatura esperada do primeiro cenário futuro e a menor no segundo. O início do novo arquivo climático pode ser observado na figura 56.

Visou
-7.54,40.38,494,0

dm	m	h	G_Dh	G_Bn	Ta	Ts	FF	DD	RH	RR	N
1	1	1	0	0	12.8	0	1.4	218	94	17.3	8
1	1	2	0	0	12.5	0	1	207	94	1.2	8
1	1	3	0	0	12.3	0	0.7	249	95	1.4	8
1	1	4	0	0	12.1	0	1	265	96	0.8	8
1	1	5	0	0	11.9	0	1	263	97	0.4	8
1	1	6	0	0	11.6	0	1.3	252	98	0.1	8
1	1	7	0	0	11.4	0	1	231	99	0.5	8
1	1	8	9	0	11.7	4.6	1.8	237	98	0.1	8
1	1	9	27	0	11.9	13.1	1.3	214	97	0	8
1	1	10	83	0	12.5	19.9	3.3	253	95	0.3	8
1	1	11	122	0	13	24.5	2.4	50	93	0.6	8
1	1	12	124	0	13.4	26.2	2.2	226	91	0	8
1	1	13	32	0	13.1	25	2.7	190	92	0	8
1	1	14	74	0	13.1	20.9	3.1	58	92	0.2	8
1	1	15	38	0	13	14.4	2.4	55	92	0.2	8
1	1	16	34	0	12.8	6.1	4	221	93	1	8
1	1	17	0	0	12.7	0	2.7	36	93	2.1	8
1	1	18	0	0	12.5	0	3.1	155	93	4.2	8
1	1	19	0	0	12.4	0	2.2	97	93	8.2	8
1	1	20	0	0	12.2	0	2.2	191	93	2.6	8
1	1	21	0	0	12	0	2.4	204	92	5.6	8
1	1	22	0	0	11.9	0	1.4	165	92	3.3	8
1	1	23	0	0	11.7	0	1	220	92	1.7	8
1	1	24	0	0	11.5	0	0.8	216	91	0.1	8
2	1	1	0	0	11.1	0	1	247	93	0.2	8
2	1	2	0	0	10.7	0	2.2	220	94	1.4	8
2	1	3	0	0	10.4	0	3.7	190	95	0.4	8
2	1	4	0	0	10	0	3.1	20	96	0	8
2	1	5	0	0	9.6	0	4	97	97	0.1	8
2	1	6	0	0	9.2	0	2.9	35	98	0	8
2	1	7	0	0	8.8	0	3.5	97	99	0	8
2	1	8	29	124	9.8	4.6	1.6	29	95	0	8
2	1	9	99	125	10.9	13.1	2.1	219	90	0	8
2	1	10	149	107	11.8	20	1.8	181	87	0	8
2	1	11	188	220	12.9	24.5	2.1	192	83	0	7
2	1	12	213	97	13.4	26.3	1.4	211	81	0	8

Figura 56 – Início do novo arquivo clima .cli com a alteração da temperatura do ar

Na sequência, foi realizada uma nova simulação com as paredes originais e o novo arquivo clima. Seguiu-se o mesmo processo já citado anteriormente, ou seja, a cópia dos dados das paredes estudadas para um ficheiro *Excel*. Novamente foi realizada a contagem das horas com risco de condensação superficial e a percentagem que essas horas representam no total das 8760 (oito mil setecentos e sessenta) horas do ano. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados obtidos com o novo ficheiro climático.

Número da fachada	Orientação	Total de horas condensadas / ano	% de horas condensadas
202	Nordeste	22	0,25 %
226	Nordeste	31	0,35 %
260	Noroeste	20	0,23 %
308	Noroeste	22	0,25 %
438	Sudeste	20	0,23 %
500	Sudoeste	19	0,22 %

É significativa a diferença entre a situação apresentada na Tabela 10 e na Tabela 6, sendo que a diferença média do total de horas é de 140 horas a menos por ano. Essa situação está, obviamente, diretamente ligada ao aumento da temperatura externa, gerando assim o aumento da temperatura da fachada. A figura 57, apresenta a comparação das temperaturas das fachadas 202 e 226, individualmente nos dois casos de estudo, atual e o cenário provável futuro.

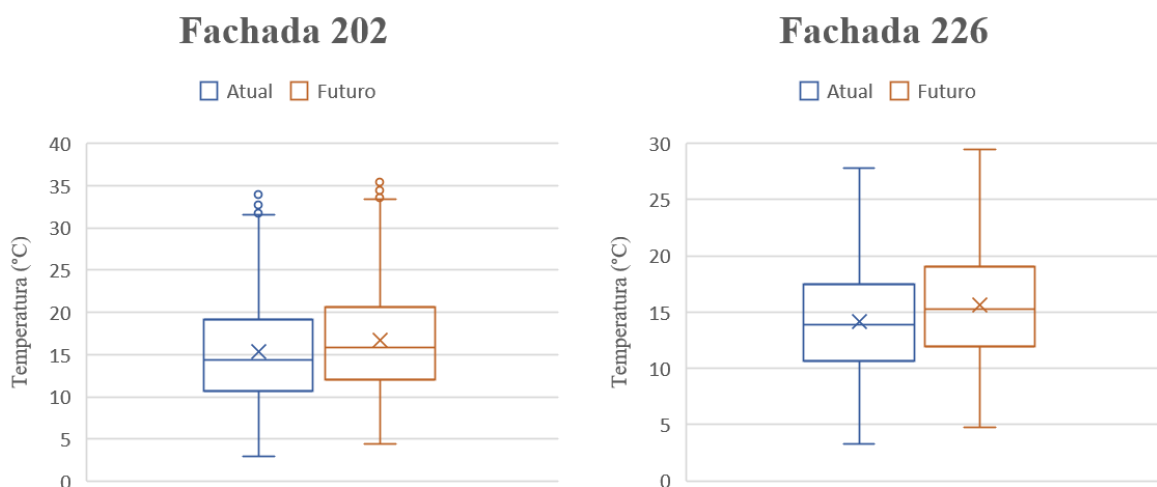


Figura 57 – Comparação das temperaturas situação atual e futura da fachada 202.

É possível perceber que a temperatura superficial do cenário climático futuro se encontra mais alta que no cenário atual. Em conformidade, tanto a média quanto a mediana do cenário futuro são mais elevadas em todos os casos. Outra comparação realizada foi o cálculo da diferença média de temperaturas de cada fachada para a situação atual e a perspectiva de futuro. Os resultados encontram-se na Tabela 11.

Tabela 11 – Comparação do cenário atual e de um futuro.

Número da fachada	Diferença média de temperatura da fachada atual e no futuro
202	1,427 °C
226	1,454 °C
260	1,445 °C
308	1,454 °C
438	1,446 °C
500	1,484 °C

A diferença média é superior a 1,4 °C em todas as fachadas, sendo que a mais afetada é a fachada 500, que se encontra na orientação sudoeste e apresenta uma grande proximidade com outras fachadas à sua frente. Já a menos afetada foi a 202, que possui orientação para nordeste e não possui outros edifícios à sua frente. Para melhor exemplificar estas ocorrências, representaram-se graficamente as diferenças de temperatura entre os dois cenários durante as horas do ano para cada fachada (Figuras 58 a 63).

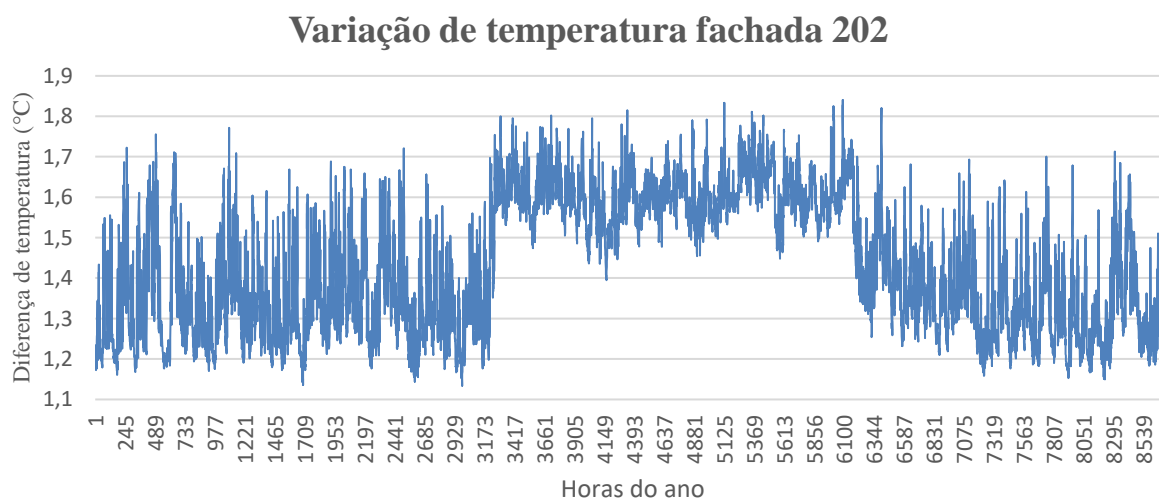


Figura 58 – Variação da diferença de temperatura entre a situação atual e futura, para as horas do ano da fachada 202.

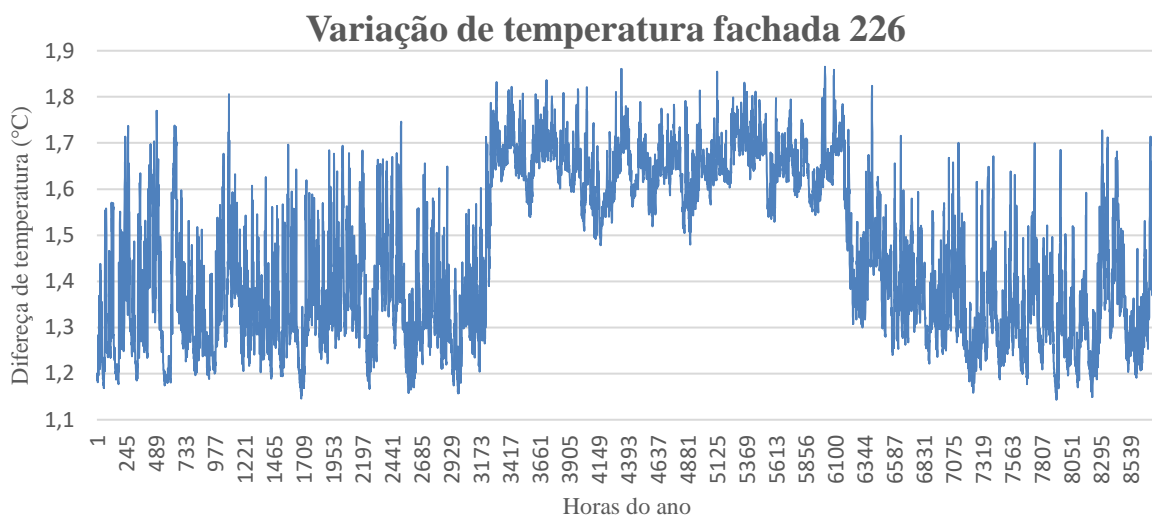


Figura 59 – Variação da diferença de temperatura entre a situação atual e futura, para as horas do ano da fachada 226.

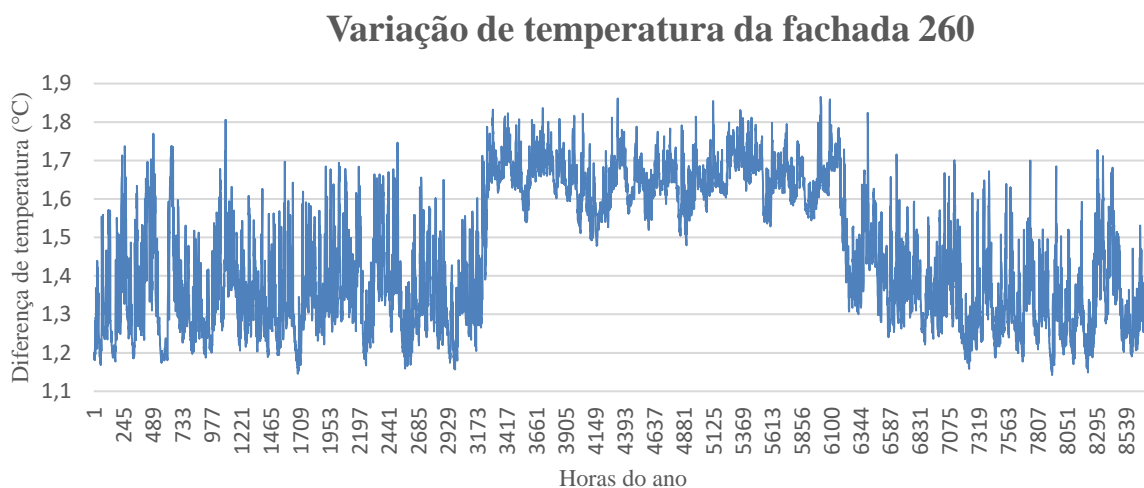


Figura 60 – Variação da diferença de temperatura entre a situação atual e futura, para as horas do ano da fachada 260.

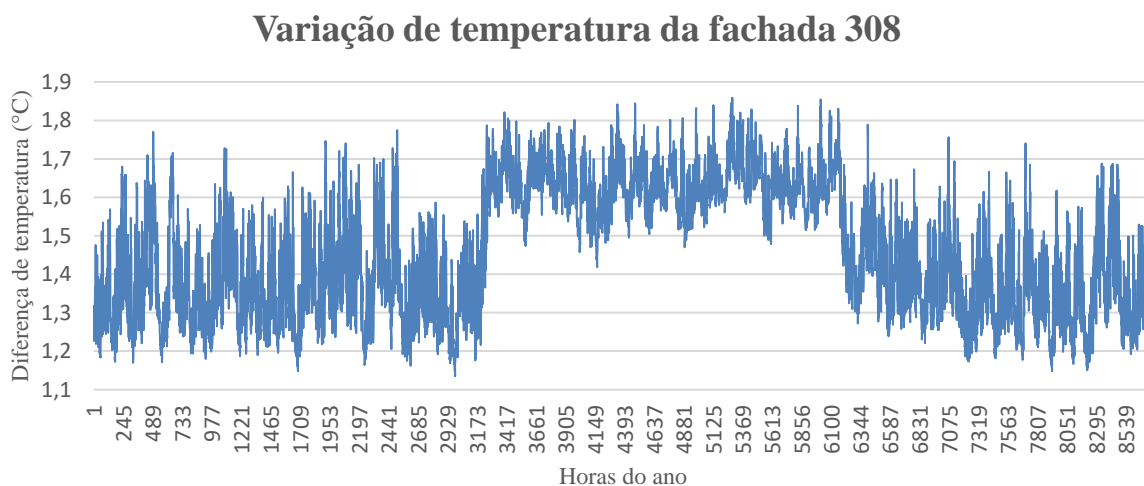


Figura 61 – Variação da diferença de temperatura entre a situação atual e futura, para as horas do ano da fachada 308.

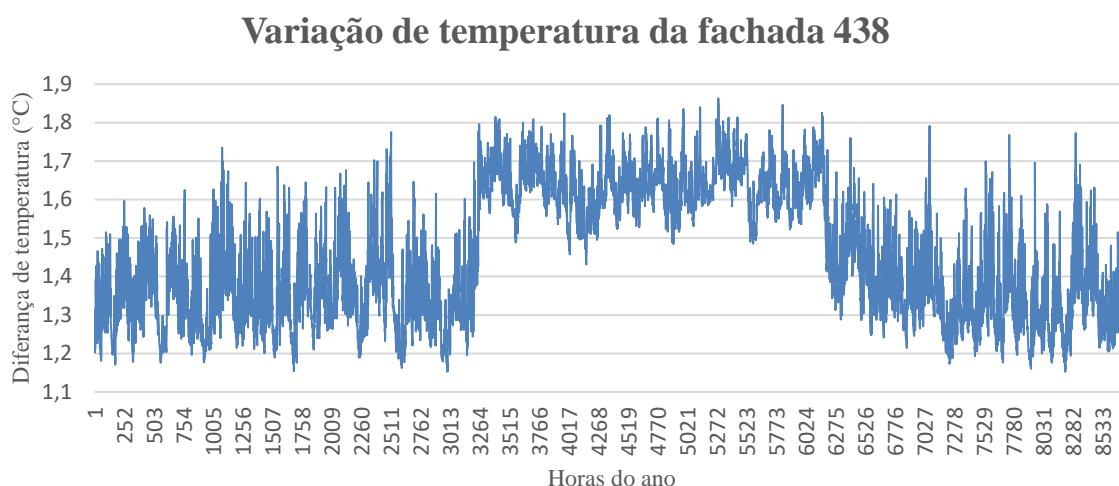


Figura 62 – Variação da diferença de temperatura entre a situação atual e futura, para as horas do ano da fachada 438.

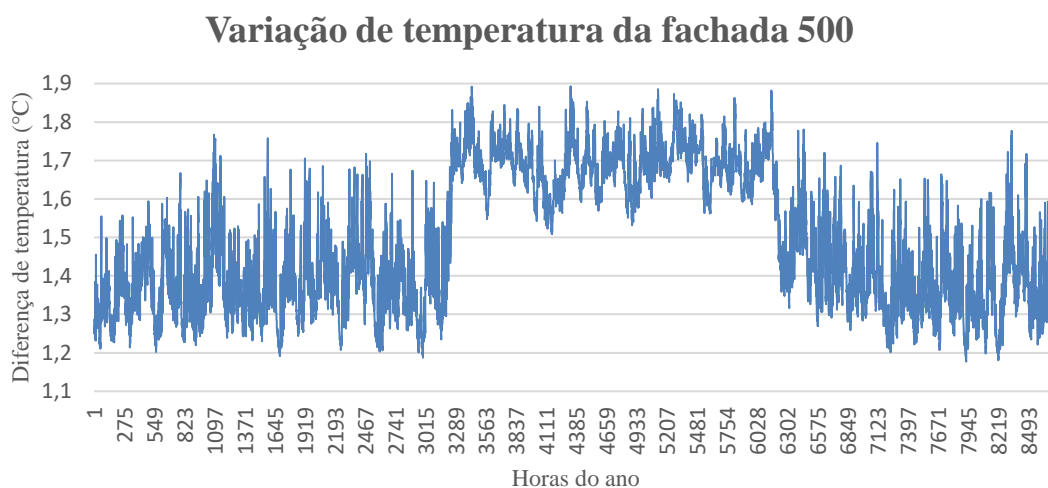


Figura 63 – Variação da diferença de temperatura entre a situação atual e futura, para as horas do ano da fachada 500.

Os gráficos mostram que a diferença de temperatura varia entre 1,2 e 1,9 °C, existindo momentos de grandes picos durante o ano. Além disso, existe uma faixa de tempo em que as diferenças ficam mais altas e não variam tanto, período que o aumento das temperaturas do arquivo climático teve maior influência. Essa situação ocorre aproximadamente entre as horas 3515 e 6527 do ano, que são referentes ao mês de junho até o mês de setembro, período de verão na região, caracterizado por temperaturas do ar mais elevadas e períodos de sol maiores.

Para entender melhor essa situação, foi realizada uma comparação das temperaturas das fachadas durante as horas 3515 e 6527 do ano, foi escolhida a fachada 202 como exemplo. Como é possível observar na figura 64, as temperaturas da situação atual (verde) são elevadas

durante as horas do dia e apresentam quedas durante o horário noturno, e as temperaturas do cenário futuro (vermelho), acompanham tanto o aumento quanto a queda das temperaturas, porém sendo sempre superior as temperaturas atuais, principalmente no período noturno e com maiores picos durante o dia. Com base nessas informações é entendido que o aumento das temperaturas do ar teve um maior impacto no período de verão do que nas demais estações.

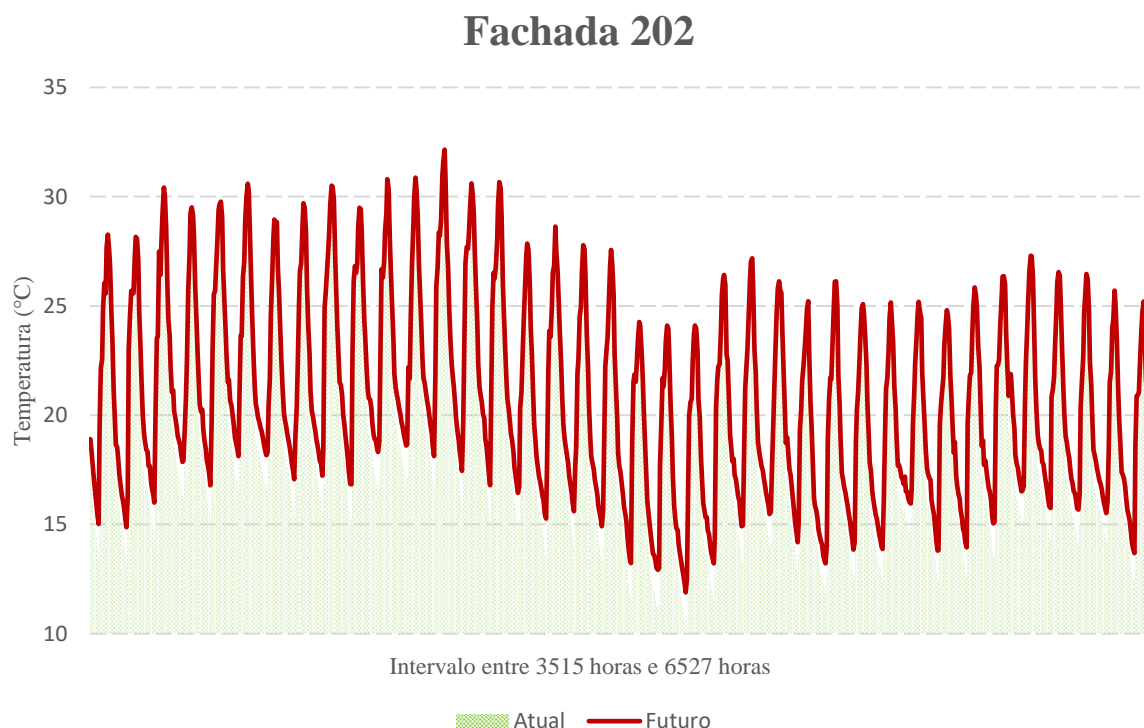


Figura 64 – Comparação das temperaturas do cenário atual e futuro da fachada 202 durante o período de 3515 e 6527 horas.

5. Conclusões

5.1 Conclusões gerais

A presente dissertação teve como objetivo elaborar, analisar e simular um modelo tridimensional de construções situadas em um quarteirão do centro histórico de Viseu, utilizando o *software CitySim*, visando avaliar o potencial do programa. Para tanto, foi efetuada uma abrangente revisão bibliográfica, abordando diversos conceitos e normas relacionados ao estudo de caso, além do próprio contexto histórico do local de estudo. Como citado, o tema de sustentabilidade e eficiência energética vem ganhando força nos últimos anos, o que se reflete no surgimento de novos estudos e pesquisas a cada ano, assim como o aparecimento e aperfeiçoamento de programas de simulação nesta área.

No que se refere ao estudo, a modelação tridimensional e as simulações efetuadas, forneceram resultados que foram de encontro às expectativas. Para além de resultados gráficos, disponibilizados no próprio programa e com visualização sobre o modelo através de diferentes colorações, o programa gerou também vários resultados em modelo de ficheiros de texto, que podem ser manipulados e tratados em folhas de cálculo, para posterior comparação, facilitando a compreensão e a análise dos dados. Adicionalmente, verificou-se que o programa pode ser utilizado em múltiplos contextos: estudos de diferentes escalas, e edifícios já existentes, ou em construção, ou planeamento, mostrando uma grande versatilidade.

Para a avaliação do potencial do *CitySim*, foram realizadas três simulações com o foco no resultado da temperatura superficial das paredes (ficheiro de texto *_TS*). A primeira simulação foi baseada na situação atual dos edifícios, que foi utilizada como base de comparação para as outras duas situações. Foram comparadas as temperaturas das fachadas externas com a temperatura de ponto de orvalho e avaliou-se o risco de ocorrência de condensações superficiais durante o ano. A segunda simulação foi referente a análise da utilização de EPS na face interna das paredes exteriores dos edifícios. Esta simulação apresentou uma pequena diminuição das temperaturas superficiais das fachadas em comparação com o cenário atual, entretanto essa pequena diferença resultou num aumento considerável do período com risco de ocorrência de condensação. Já a terceira simulação, baseada em um provável cenário de clima futuro, resultou num aumento considerável nas temperaturas superficiais da fachada, em comparação com a simulação inicial e uma diminuição do período de risco de condensação. Globalmente, os resultados evidenciaram a grande influência da orientação dos edifícios nas temperaturas superficiais das fachadas, bem como o efeito da presença de edifícios adjacentes ou próximos.

Com relação às dificuldades para o desenvolvimento do trabalho, o maior obstáculo foi a criação do modelo tridimensional e a sua exportação para o *CitySim*, para que o programa reconhecesse todas as superfícies da forma adequada e compatíveis com o *software*. Além disso, por se tratar de um *software* recente ainda, são poucos os documentos sobre simulações realizadas noutros casos de estudo, dificultando a utilização de todo o potencial do programa.

5.2 Sugestões de trabalhos futuros

A partir dos resultados obtidos e das observações no decorrer deste trabalho, sugere-se para trabalhos futuros:

- Analisar os dados da temperatura superficial da parede relacionando-os com as questões da durabilidade das soluções construtivas, analisando também os ciclos de temperatura e os valores máximos atingidos;
- Analisar outros ficheiros de resultados obtidos realizando outras comparações;
- Aperfeiçoamento do modelo tridimensional, adicionando mais informações referentes a estruturação e funcionamento dos edifícios;

- Efetuar novas simulações com adições de novos materiais na fachada interna e/ou outros cenários futuros.

REFERÊNCIAS

- Almeida, I. D. de & Abranja, N. A. (2009). *Turismo e Sustentabilidade*. In: COGITUR - Journal of tourism studies. Universidade Lusófona de Humanidades. Portugal, n.2.
- Andrade, L. M. S. de & Romero, M. A. B. (2004). *Desenho de assentamentos urbanos sustentáveis proposta metodológica*. I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável; X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente.
- BCSD Portugal. (2023). *Masterclass objetivos de desenvolvimento sustentável*. <https://bcsdportugal.org/masterclass-ods/>
- Bergerson, J., Muehleisen, R. T., Rodda, B. & Auld, J. A. (2015). *Designing future cities: LakeSIM integrated design tool for assessing short and long term impacts of urban scale conceptual designs*. ISOCARP Review 11.
- Bergerson, J., Muehleisen, R. T., Tatara, E., Graziano, D. & Collier, N. (2016). *Agent based modeling for smarter building energy simulation and energy efficiency technology evaluation*.
- BUILD. (2023). *About Bsim*. <https://build.dk/bsim/Pages/About-BSim.aspx>
- Carlo, J. C. & Lamberts, R. (2010). *Parâmetros e métodos adotados no regulamento de etiquetagem da eficiência energética de edifícios – parte 1: método prescritivo*. Ambiente Construído, vol. 10, n° 2.
- Carvalho, D., Cardoso, S. P. & Rocha, A. (2021). *Future surface temperature changes for the Iberian Peninsula according to EURO-CORDEX climate projections*. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05472-3>
- Clarke, J. (2007). *Energy simulation in building design*. 2 ed. London: Routledge.
- Colin, S. (2010). *Técnicas construtivas do período colonial – I*. <https://coisasdaarquitectura.wordpress.com/2010/09/06/tecnicas-construtivas-do-periodo-colonial-i/>
- Davis, D. (2013). *Modelled on Software Engineering: Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture*. Tese (Doutorado em Filosofia) - School of Architecture and Design College of Design and Social context, RMIT University, Melbourne, Austrália.
- DEC – Departamento Engenharia Civil. (2023). *A cidade de Viseu*. <https://dep.estgv.ipv.pt/departamentos/dcivil/viseu/>
- Dornelles, K. A. (2008). *Absorbância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA*. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

- Energy Plus. (2023). *Energy Plus*. <https://energyplus.net/>
- ESSS – Engineering Simulation and Scientific Software. (2023). *Ansys*. https://www.esss.co/ansys/?utm_source=google&utm_medium=paidsearch&utm_campaign=ansys&gclid=Cj0KCQiAuqKqBhDxARIsAFZELmJOo8VX9bX1rGdvpjrq3wTiEQVU9sIIgPwEY-80njiRJyZ64n1TAgoaAjTkEALw_wcB
- European Commission. (2023a). *Sustainability and cultural heritage*. <https://culture.ec.europa.eu/cultural-heritage/cultural-heritage-in-eu-policies/sustainability-and-cultural-heritage>
- European Commission. (2023b). *Energy Performance of Buildings Directive*. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en
- European Commission. (2023c). *Energy Performance of Buildings Directive*. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans-package_en
- Fenn, J. & Raskino, M. (2008). *Mastering the hype cycle: how to choose the right innovation at the right time*. Boston: Harvard Business Press.
- Geller, H. (2022). *Energy revolution: policies for a sustainable future*. Washington, DC: island press. <https://web.p.ebscohost.com/ehost/ebookviewer/ebook?sid=d8b8e96e-fc2b-4475-a60b-1a0c362250f1%40redis&vid=4&rid=3&format=EB>
- Global Copact Network Portugal. (2023). *A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. <https://globalcompact.pt/index.php/en/2030-agenda>
- Guedes, M. C., Pinheiro, M. D. & Alves, L. M. (2009). *Sustainable architecture and urban design in Portugal: An overview*. Renewable Energy. vol 34.
- Hong, T., Langevin, J. & Sun, K. (2018). *Building simulation: Ten challenges*. Building Simulation, 11(5), pp. 871–898. doi: 10.1007/s12273-018-0444-x.
- Hong, T., Chen, Y., Luo, X., Luo N. & Lee, S. H. (2019). *Tem questions on urban building energy modeling*. Building and Environment. Volume 168, jan.
- IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo. (2004). *Validação de softwares aplicativos para simulação do comportamento térmico das edificações*.
- IDSPS-USA: building energy software tools. (2018). *Trace700*. <https://www.buildingenergysoftwaretools.com/software/trace-700-load-design>
- Jesus, P. P. (2015). *Centro histórico de Viseu reabilitação de edifício na rua do comércio. Covilhã*.

REFERÊNCIAS

- Jornal do Centro. (2023). *Sabia que? Um retrato da região Viseu Dão Lafões*. <https://jornaldocentro.pt/noticias/infografias/sabia-que-um-retrato-da-regiao-viseu-dao-lafoes>
- Kameo. (2023). *CitySim Pro*. <http://www.kaemco.ch/download.php>
- Kämpf, J. H. & Robinson, D. (2007). *A simplified thermal model to support analysis of urban resource flows*. Energy and Buildings, vol. 39.
- Kämpf, J. H. & Robinson, D. (2009). *Optimisation of urban energy demand using an evolutionary algorithm*. Eleventh International IBPSA Conference. Scotland.
- Karppinen, A., Kukkonen, J., Nordlund, G., Rantakrans, E. & Valkama. (1998/9?). *A dispersion modelling system for urban air pollution*. Finnish Meteorological Institute, Publications on Air Quality 28. Helsinki.
- Keirstead, J., Samsatli, N. & Shah, N. (2009). *SynCity: an integrated tool kit for urban energy systems modelling*. Fifth Urban Research Symposium.
- KUBO, K. G. (2017). *A influência das variáveis do Design Day, consideradas na simulação com o EnergyPlus e desconsideradas pela NBR 15575/2013, nos resultados de desempenho térmico de edificações*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Kuennen, C. R. (1998). *The limits of efficiency: policy impacts and implications for sustainable development*. University of Delaware. Anais do 1998 ACEEE Summer study on energy efficiency in buildings.
- Lamberts, R., Dutra, L. & Pereira, F. (1997). *Eficiência Energética na Arquitetura*. 3. ed. São Paulo: PW.
- LabEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. (2023). *Simulação Termo-Energética de Edificação*. <https://labeee.ufsc.br/linhas-de-pesquisa/simulacao-termo-energetica-de-edificacoes>
- Leite, E. F. W. & Hackenberg, A. M. (2020). *Eficiência energética de envoltória: comparação dos métodos de avaliação RTQ-C e INI-C através de estudo de caso*. Revista gestão e sustentabilidade ambiental, Florianópolis, v. 9, p. 532-552.
- LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil. (2006). *Coefficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envoltória dos Edifícios*. <https://pt.scribd.com/doc/283939592/Coefficientes-de-Transmissao-Termica-de-Elementos-Da-Envoltora-Dos-Edificios-LNEC-ITE-50>
- Madipê. (2023). *Instalação de pisos de madeira*. <https://www.madipe.com.br/instalacao-de-pisos-de-madeira>
- MENKES, M. (2004). *Eficiência Energética, Políticas Públicas e Sustentabilidade*. Brasília.

- Mendonça, P. (2005). *Habitar sob uma segunda pele*. Anexo 1. <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/4250/14/TeseDoutMendonca14.pdf>
- Nayak, S. S. & Sharma, V. (2019). *Technical paper on use of smart urban simulation software: “CitySIM” for creation of smart cities in developing*. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). Vol 6.
- NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration. (2023). *National Centers for Environmental Information*. <https://www.ncei.noaa.gov/>
- ONU – Organização das Nações Unidas. (2004). *World Urbanization Prospects: The 2003 Revision*. Department of Economic and Social Affairs / Population Division. New York: United Nations.
- Pinto, J. P. R. (2015). *Diagnóstico e reabilitação energética de edifícios existentes – casos de estudo*. Universidade da Beira Interior.
- Pnuma-Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. (2020). *Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*.
- Pressman, R. S. (2011). *Engenharia de software: uma abordagem profissional*. Tradução de Ariovaldo Griesi e Mario Moro Fecchio. Revisão técnica de Reginaldo Arakaki, Julio Arakaki e Renato Manzan de Andrade. 7. ed. Porto Alegre: AMGH.
- Projeteer – Projetando Edificações Energeticamente Eficientes. (2023a). *Pisos e coberturas – forro PVC 1 cm | câmara de ar (>5,0 cm) | Telha cerâmica 1 cm*. <https://www.mme.gov.br/projeteer/componente/forro-pvc-1-cm-camara-de-ar-50-cm-telha-ceramica-1-cm/>
- Projeteer – Projetando Edificações Energeticamente Eficientes. (2023b). *Vidro simples incolor 6 mm*. <https://www.mme.gov.br/projeteer/componente/vidro-simples-incolor-6-mm/>
- Robinson, D., Haldi, F., Kämpf, J. Leroux, P., Perez, D., Rasheed, A. & Wilke, U. (2009). *CitySIM: comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable urban planning*. Eleventh International IBPSA Conference. Scotland.
- Roriz, L. & Ramos, A. (2008). *Desenvolvimento de modelo numérico de aplicação do RCCTE: Sua implementação em edifícios existentes*. Instituto Superior Técnico. Lisboa.
- Sage, A. P. (1998). *Risk management for sustainable development*. IEEE - International Conference on System, Man and Cybernetics.
- SCE – Sistema de Certificação Energética dos Edifícios. (2023). *Legislação*. <https://www.sce.pt/legislacao/>
- Silveira, F. M. (2014). *Análise do desempenho térmico de edificações residenciais ventiladas naturalmente: NBR 15575 e ASHRAE 55*. Universidade Estadual de Campinas.

REFERÊNCIAS

- Sousa, F. P. de & Silva, A. S. (2021). *Manual de introdução à simulação de desempenho de edifícios – um curso para iniciantes no software Energy Plus*. Universidade Federal do Mato Grosso do Sul.
- Sorgato, M. J. (2009). *Desempenho Térmico de Edificações Residenciais Unifamiliares Ventiladas Naturalmente*. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- TRNSYS. (2023). *Wha tis TRNSYS?*. <https://www.trnsys.com/>
- UNEP – United Nations Environment Programme. (2009). *Avaliação de políticas públicas para redução da emissão de gases de efeito estufa em edificações*.
- US Report of the National Policy Development Group. (2001). *Using energy wisely. Increasing Energy Conservation and Efficiency*. In: Reliable affordable and environmentally sound energy for the American Future. Washington.
- U.S. Energy Information Administration. (2021) *International Energy Outlook 2021 (IEO2021)*.

ANEXO A

Tipo	Número	Cor	Nome	α	Tipo	Número	Cor	Nome	α
Acrílica Fosca	01		Amarelo Antigo	51,4	Látex PVA Fosca	40		Branco Gelo	34,0
	02		Amarelo Terra	64,3		41		Erva doce	21,9
	03		Areia	44,9		42		Flamingo	46,8
	04		Azul	73,3		43		Laranja	39,9
	05		Azul Imperial	66,9		44		Marfim	29,7
	06		Branco	15,8		45		Palha	28,5
	07		Branco Gelo	37,2		46		Pérola	25,7
	08		Camurça	57,4	47		Pêssego	39,5	
	09		Concreto	74,5	Acrílica Fosca	48		Alecrim	64,0
	10		Flamingo	49,5		49		Azul bali	48,9
	11		Jade	52,3		50		Branco Neve	10,2
	12		Marfim	33,6		51		Branco Gelo	29,7
	13		Palha	36,7		52		Camurça	55,8
	14		Pérola	33,0		53		Concreto	71,5
	15		Pêssego	42,8		54		Marfim	26,7
	16		Tabaco	78,1		55		Marrocos	54,7
	17		Terracota	64,6		56		Mel	41,8
Acrílica Semi-brilho	18		Amarelo Antigo	49,7		57		Palha	27,2
	19		Amarelo Terra	68,6		58		Pérola	22,1
	20		Azul	79,9		59		Pêssego	35,0
	21		Branco Gelo	36,2		60		Telha	70,8
	22		Cinza	86,4		61		Vanila	23,9
	23		Cinza BR	61,1	Látex PVA Fosca	62		Amarelo Canário	25,2
	24		Crepúsculo	66,0		63		Areia	35,7
	25		Flamingo	47,3		64		Azul Profundo	76,0
	26		Marfim	33,9		65		Branco Neve	16,2
	27		Palha	39,6		66		Branco Gelo	28,1
	28		Pérola	33,9		67		Camurça	53,2
	29		Preto	97,1		68		Cerâmica	65,3
	30		Telha	69,6		69		Concreto	71,6
	31		Terracota	68,4		70		Flamingo	44,4
	32		Verde Quadra	75,5		71		Marfim	24,5
	33		Vermelho	64,2		72		Palha	26,4
Látex PVA Fosca	34		Amarelo Canário	29,3	73		Pérola	22,9	
	35		Amarelo Terra	61,4	74		Pêssego	29,8	
	36		Areia	39,0	75		Preto	97,4	
	37		Azul angra	32,3	76		Vanila	27,7	
	38		Bianco Sereno	26,6	77		Verde Musgo	79,8	
	39		Branco	11,1	78		Vermelho Cardinal	63,3	

* As imagens das cores aqui apresentadas podem não representar com exatidão a cor da tinta quando aplicada sobre as superfícies construtivas.

* α : 300 a 2500 nm (Espectro solar total).

Fonte: Dornelles, K. A. (2008).